

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ 5 2025

«Автоматичне зварювання»

«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)

Видається з 1948 р.

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as

Published since 1948

ЗМІСТ

Л.М. Лобанов – 85! 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Лобанов Л.М., Ниркова Л.І., Пащин М.О., Міходуй О.Л., Тимошенко О.М., Тодорович Н.Л., Сизоненко О.М., Кондратенко І.П., Чопик В.В., Карлов О.М. Дослідження технологічних процесів оброблення металевих сплавів і зварних з'єднань електромагнітним полем (Огляд) 5

Махненко О.В., Мужиченко О.Ф., Прудкий І.І., Басистюк Н.Р. Залишкові напруження у вузлі з'єднання колектора з патрубком ДУ1200 парогенератора ПГВ-1000 в результаті локальної термічної обробки 16

Головко В.В., Штофель О.О., Короленко Д.Ю. Використання математичного методу перетворення Гафа для металографічних досліджень мікроструктури ферито-бейнітних сталей 25

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Зяxor І.В., Антіпін Є.В., Дідковський О.В., Левчук А.М., Калюжний В.В., Озюменко В.В., Великоіваненко О.А., Руденко П.М., Шило Ю.А. Актуальні проблеми зварювання залізничних рейок в Україні 31

Коржик В.М., Гринюк А.А., Бабич О.А., Берднікова О.М., Ілляшенко Є.В., Бушма О.І. Отримання функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів «Ti-6Al-4V + WC» методом адитивного плазмово-дугового наплавлення 48

Позняков В.Д., Коренев О.В. Механічні властивості металу ділянок зварних з'єднань середньовуглецевих легованих сталей, що нагрівалися до температур від 350 до 800 °С 56

Майданчук Т.Б., Бондаренко А.М., Ілюшенко В.М., Лук'яненко Є.П. Відновлення дзвонів і художніх ливарних виробів із мідних сплавів 60

Новодранов А.С., Савицький О.М. Автоматизація процесу виготовлення елемента бурового інструменту способом адитивного наплавлення 68

Козулін С.М., Фомакін А.А., Міщенко Р.М., Петренко Л.М. Відновлення зношених зубів шестерень кар'єрного екскаватора електрошлаковим наплавленням 75

ІНФОРМАЦІЯ

Пам'яті Валерія Миколайовича Шлепакова 81

Вибух зварює і розрізає метал 82

Fronius Fortis: зварювання MIG/MAG нового покоління – гнучке, функціональне, потужне 87

CONTENTS

L.M. Lobanov is 85! 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Lobanov L.M., Nyrkova L.I., Pashchyn M.O., Mikhoduy O.L., Tymoshenko O.M., Todorovych N.L., Syzonenko O.M., Kondratenko I.P., Chopyk V.V., Karlov O.M. Investigations of technological processes of treatment of metal alloys and welded joints by electromagnetic field (Review) 5

Makhnenko O.V., Muzhichenko O.F., Prudkiy I.I., Basistyuk N.R. Residual stresses in the joint of the collector to the DN1200 branch pipe of the PGV-1000 steam generator due to local heat treatment 16

Holovko V.V., Shtofel O.O., Korolenko D.Yu. Use of the hough transformation method for the metallographic studies of ferritic-bainitic steels microstructure 25

INDUSTRIAL

Ziakhor I.V., Antipin Ye.V., Didkovskiy O.V., Levchuk A.M., Kalyuzhny V.V., Ozyumenko V.V., Velykoivanenko O.A., Rudenko P.M., Shylo Yu.A. Urgent problems of welding railway rails in Ukraine 31

Korzhyk V.M., Grynyuk A.A., Babych O.A., Berdnikova O.M., Illiashenko Ye.V., Bushma O.I. Obtaining functionally-graded metal-matrix materials Ti-6Al-4V + WC by the method of additive plasma-arc deposition 48

Poznyakov V.D., Korieniev O.V. Mechanical properties of metal in areas of welded joints of medium carbon alloy steels heated to temperatures from 350 to 800 °C 56

Maidanchuk T.B., Bondarenko A.M., Ilyushenko V.M., Lukyanchenko E.P. Restoration of bells and artistic castings products made of copper alloys 60

Novodranov A.S., Savytskyi O.M. Automation of the manufacturing process of a drilling tool element using additive deposition method 68

Kozulin S.M., Fomakin A.A., Mishchenko R.N., Petrenko L.M. Restoration of worn gears of a quarry excavator by electrosag surfacing 75

INFORMATION

In memory of V.M. Shlepakov 81

Explosion welds and cuts metal 82

Fronius Fortis: manual MIG/MAG welding of the latest generation with the powerful, flexible and fully digitalized 87



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну в Міжнародному інституті зварювання та в Європейській зварювальній федерації
The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine in International Institute of Welding and in European Federation for Welding



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України
Міжнародний науково-технічний та виробничий журнал
E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine
International Scientific-Technical and Production Journal
«Автоматичне зварювання»

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (Київ):

І.В. Кривцун (головний редактор),

О.М. Берднікова, В.В. Кнись,

В.М. Коржик, В.А. Костін, Ю.М. Ланкін,

Л.М. Лобанов, С.Ю. Максимов,

О.В. Махненко, М.О. Пашчин,

В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,

І.Ю. Романова – відповідальний секретар;

В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;

В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко,

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;

А.Л. Майстренко,

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ;

В.В. Перемітько,

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське;

У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,

Аахен, Німеччина.

Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко,

Міжнародна Асоціація «Зварювання», Київ

Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ

03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 131, 132, 141, 151.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу

Журнал зареєстровано Національною радою України з
питань телебачення і радіомовлення 11.09.2025;

ідентифікатор медіа R30-06491;

реєстрант – ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

ISSN 3041-2374 print

ISSN 3041-234X online

DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

Передплата 2026

Передплатний індекс 70031.

6 випусків на рік (видається раз на два місяці).

Друкована версія: 2520 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 2520 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).

Передплата можлива на попередні випуски за любий рік.

Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевідаються англійською мовою в журналі
«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute
of NASU (Kyiv, Ukraine):

I.V. Krivtsun (Editor-in-Chief),

O.M. Berdnikova, V.V. Knysh,

V.M. Korzhyk, V.A. Kostin, Yu.M. Lankin,

L.M. Lobanov, S.Yu. Maksimov,

O.V. Makhnenko, M.O. Pashchin,

V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev,

I.Yu. Romanova – Executive Secretary;

V.V. Dmitrik, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Kharkiv, Ukraine;

V.V. Kvasnytskyi, E.P. Chvertko, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;

A.L. Maistrenko, V. Bakul Institute for Superhard Materials
of the NASU, Kyiv, Ukraine;

V. V. Peremitko, Dniprovsky State Technical University,
Kamianske, Ukraine;

U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany.
Executive Director – O.T. Zelnichenko,

International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Publisher

International Association «Welding»

Editorial office

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU

03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

Tel./fax: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 131, 132, 141, 151.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for publishing Editorial Board of the Journal

The Journal was registered by the National Council of Ukraine
on Television and Radio Broadcasting on 11.09.2025,
carrier identifier R30-04566.

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

ISSN 3041-2374 print

ISSN 3041-234X online

DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

Subscription 2025

Subscription index 70031.

6 issues per year, back issues available.

192€, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

156€, subscriptions for the electronic version

(sending issues of Journal in pdf format

or providing access to IP addresses).

Subscription is possible for previous issues for any year.

Articles from «Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)
journal is republished selectively in English in
«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

Publisher is not responsible
for the content of the promotional material.

Л.М. ЛОБАНОВУ – 85!



Колектив Інституту електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, редколегія та редакція журналу «Автоматичне зварювання» щиро вітають головного редактора журналу академіка НАН України Леоніда Михайловича Лобанова з ювілеєм!

Академік НАН України Л.М. Лобанов – визначний вчений у галузі матеріалознавства, зварювання, міцності та діагностики матеріалів і зварних конструкцій.

Л.М. Лобанов народився 29 вересня 1940 р. У 1962 р. закінчив факультет промислового та цивільного будівництва Київського інженерно-будівельного інституту, а в 1968 р. – без відриву від роботи закінчив вечірнє відділення механіко-математичного факультету Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка. Уся його наукова діяльність пов'язана з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, в якому він працює з 1963 р. У 1969 р. захистив кандидатську, а в 1984 р. – докторську дисертацію, у 1991 р. йому присуджено вчене звання професора. У 1990 р. Л.М. Лобанова обрано членом-кореспондентом АН УРСР, у 1997 р. – дійсним членом (академіком) НАН України.

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

В його перших наукових працях були створені фізичні та математичні положення оптичного моделювання зварних напружень, побудовано теорію їх подібності. На цій основі вперше у світовій практиці визначено особливості напружених станів, що виникають при зварюванні полімерних матеріалів. Встановлено фундаментальні положення про загальні для металів і полімерів закономірності розподілу напружень при зварюванні різноманітних типів з'єднань.

Широке визнання одержали праці Л.М. Лобанова, присвячені розробці методів лазерної інтерферометрії для дослідження якості та напружено-деформованих станів зварних з'єднань. Ним отримані аналітичні співвідношення для визначення точності виміру компонентів векторів переміщень поверхонь об'єктів у залежності від параметрів оптичних схем голографічних інтерферометрів і виведені рівняння для розрахунку переміщень за градієнтами порядків інтерференційних смуг. Побудовано та реалізовано алгоритми, які дають можливість на основі даних голографічних вимірів розрахувати компоненти векторів переміщень для великих масивів точок. Створено технологію діагностики виробів авіакосмічної техніки, в основу якої покладено новий метод неруйнівного контролю якості – електронна ширографія, заснований на застосуванні лазерної апаратури та комп'ютерної обробки оптичної інформації. Його важливою перевагою є безконтактність вимірів і можливість здійснювати в реальному масштабі часу неруйнівний контроль об'єктів як із металевих, так і композиційних матеріалів. Розроблені технології діагностики та ширографічна апаратура впроваджені в КБ «Південне» й надані за контрактами науково-дослідним лабораторіям країн дальнього зарубіжжя.

Розроблено високоефективний метод визначення залишкових напружень, що заснований на поєднанні спекл-інтерферометрії та застосування малих отворів діаметром до 1 мм. Для його реалізації створено портативні прилади, що не мають аналогів у світовій практиці. Автоматизована система комп'ютерної обробки інтерферограм, які спостерігаються при створенні малих отворів, дозволяє отримувати кількісні значення напружень з високою точністю, про що свідчить конкурс, проведений Міжнародним інститутом зварювання. Доведено, що цей метод і апаратура для його реалізації забезпечують найбільш достовірні результати вимірювань. Здійснено комплекс досліджень зі створення повністю неруйнівного методу визначення залишкових напружень на основі електронної спекл-інтерферометрії і введення локального імпульсу струму в контрольовану зону.

Проведені дослідження особливостей релаксації залишкових напружень та еволюції структуроутворення під дією імпульсів струму високої щільності на зварні з'єднання конструкційних металів і сплавів показали, що збільшення параметрів і тривалості імпульсів електричного струму дає можливість регулювати напружено-деформований стан зварних з'єднань і підвищити їхні експлуатаційні властивості. Розроблені технологія та обладнання дали можливість виконати електродинамічну зміцнюючу обробку виробів авіакосмічної і суднобудівної галузі.

Завдяки працям Л.М. Лобанова та його учнів сформовано новий науковий напрямок – бездеформаційне зварювання конструкцій, який базується на регулюванні термодформаційних процесів під час зварювання та створенні попередніх перед зварюванням напружено-деформованих станів, оптимізованих стосовно зварювальних напружень і деформацій. Розроблені методи й технічні засоби усунення зварювальних деформацій було використано при створенні комплексу «Енергія-Буран» та інших ракетно-космічних систем.

Упродовж останніх років під науковим керівництвом Л.М. Лобанова виконується комплекс нових досліджень у галузі статичної та циклічної міцності зварних з'єднань, опору їх крихким руйнуванням і руйнуванням від втоми, також розроблюються наукові підходи для підвищення міцності й довговічності зварних конструкцій, їх неруйнівного контролю та діагностики. Створюються нові типи ефективних зварних конструкцій, зокрема унікальні конструкції перетвореного об'єму космічного призначення.

Л.М. Лобанов проводить значну роботу з розвитку системи стандартизації та сертифікації зварювальних технологій, матеріалів та обладнання. З 1992 р. від очолює створений за його участю Національний технічний комітет України зі стандартизації ТК-44 «Зварювання і споріднені технології», а також є Головою виконавчого комітету Міжнародного науково-технічного центру «ПАТОН-СЕРТ», який проводить сертифікацію зварювальних виробництв на відповідність вимогам серії міжнародних стандартів ISO. Отримані у МНТЦ «ПАТОН-СЕРТ» сертифікати на зварювальне виробництво дають право виходу на європейські та міжнародні ринки.

Л.М. Лобанов – автор понад 900 наукових праць, серед яких 8 монографій, більше 90 авторських свідоцтв і патентів. Він створив визнану наукову школу в галузі зварних конструкцій, підготував 12 докторів та 17 кандидатів технічних наук, 2 доктори філософії.

Поряд з інтенсивною науковою діяльністю Л.М. Лобанов протягом багатьох років веде велику науково-організаційну роботу. З 1985 р. він є заступником директора з наукової роботи Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та керівником відділу «Оптимізація зварних конструкцій нової техніки» цього Інституту. Водночас з 2015 по 2020 рр. був академіком-секретарем Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України і членом Президії НАН України, нині – радник Президії НАН України; є головою Українського технічного комітету зі стандартизації в галузі зварювання та споріднених технологій; головою секції «Зварні конструкції» вченої ради Інституту електрозварюван-

ня ім. Є.О. Патона; головою спеціалізованої ради із захисту дисертацій при цьому Інституті; головним редактором журналу «Технічна діагностика і неруйнівний контроль», членом редколегії журналів: «Автоматичне зварювання», «The Paton Welding Journal», «Космічна наука і технологія», «Стандартизація, сертифікація, якість», «Питання атомної науки і техніки», «Фізико-хімічна механіка матеріалів», «Промислове будівництво та інженерні споруди», «Przeglad Spawalnictwa»; «Journal of Magnesium and Alloys»; членом правління Українського товариства з неруйнівного контролю і технічної діагностики; членом Президії Національного комітету України з технічної та прикладної механіки та Європейського товариства з цілісності конструкцій (ESIS); членом Американського зварювального товариства; членом секції «Матеріалознавство» Комітету з Національної премії імені Бориса Патона.

Різноманітна активна та плідна діяльність Л.М. Лобанова, його вагомий внесок у розвиток науки, підготовку висококваліфікованих кадрів, впровадження результатів досліджень у практику здобули високе визнання. Л.М. Лобанов – лауреат премії Ради міністрів СРСР (1981 р.), лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (1994 р.), заслужений діяч науки і техніки України (2004 р.). Він нагороджений орденами: «Ярослава Мудрого V ст.» (2018 р.), «За заслуги» I (2014 р.), II (2009 р.), III (1997 р.) ступенів, «Знак пошани» (1982 р.), відзнаками НАН України «За наукові досягнення» (2007 р.) і за підготовку наукової молоді» (2015 р.); премією ім. Є.О. Патона НАН України (2004 р.); медаллю Ю.В. Кондратюка (1997 р.); нагрудним знаком Національного космічного агентства України «Почесний працівник космічної галузі» (2000 р.); нагрудним знаком Конструкторського бюро «Південне» «За створення ракетно-космічної техніки» (2015 р.); нагрудним знаком Київського міського голови «Знак пошани» (2003 р.); Почесною грамотою Ради національної безпеки і оборони України (2018 р.); Почесним золотим знаком Польського науково-технічного товариства (2014 р.), Відзнаками НАН України «За сприяння розвитку науки» та «За підготовку наукової зміни»; Почесною грамотою НАН України «За самовіддану наукову і науково-організаційну роботу», Почесною грамотою Міністерства енергетики та вугільної промисловості України (2015 р.), Знаком АТ «Турбоатом» «За заслуги» (2019 р.); Золотою медаллю імені Б.Є. Патона Національної академії наук України (2022 р.).

Леонід Михайлович Лобанов все своє життя присвятив науковій діяльності, його праці — безцінний внесок у розвиток науки і техніки нашої країни!

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ І ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ (Огляд)

Л.М. Лобанов¹, Л.І. Ниркова¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Міходуй¹, О.М. Тимошенко¹, Н.Л. Тодорович¹, О.М. Сизоненко³, І.П. Кондратенко², В.В. Чопик², О.М. Карлов²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Берестейський, 56. E-mail: dep7ied@ukr.net

³Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. 54018, м. Миколаїв, просп. Богоявленський, 43а.

E-mail: dioo@iippt.com.ua

Проведено аналіз перспективних технологій покращення механічних характеристик і напруженого стану металевих сплавів і зварних з'єднань, які базуються на застосуванні електромагнітних полів та їх похідних, таких як електродинамічна сила тиску, вихрові струми та ударні хвилі. Розглянуто процес електрогідроімпульсного оброблення високовольним електричним розрядом із використанням вуглеводневої рідини для виробництва полідисперсних сумішей, що застосовуються для легування металу шва зварних з'єднань у складі порошкових дротів. Зазначено позитивний вплив отриманих таким обробленням мікродобавок модифікатора системи Ti–TiC на експлуатаційні властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС. Показано, що оброблення імпульсним електромагнітним полем сприяє покращенню залишкових напружених станів зварних з'єднань. Розглянуто нові технологічні схеми застосування електродинамічного оброблення зварних з'єднань. Доведено переваги цих двох обробок металу шва в процесі зварювання у порівнянні з обробками за кімнатної температури. Досліджено механізм поверхневого зміцнення сталі 25XГНМТ внаслідок її оброблення імпульсним бар'єрним розрядом. Доведено, що він сприяє підвищенню щільності дислокацій та диспергуванню мікроструктури, тобто позитивно впливає на механічні характеристики сталі. Розглянуто перспективи його застосування для неруйнівного контролю залишкових напружених станів зварних з'єднань. Бібліогр. 46, рис. 6.

Ключові слова: зварне з'єднання, оброблення електромагнітним полем, електродинамічне оброблення, залишкові напруження, зварювання плавленням, поверхнєве зміцнення, карбід титану, полідисперсні суміші, залишкові деформації, алюмінієві сплави, конструкційні сталі, щільність дислокацій

Вступ. Розвиток високотехнологічних галузей машинобудування стимулює розробку нових технологій продовження експлуатаційного ресурсу зварних конструкцій на базі використання прогресивних електрофізичних явищ, до яких відносяться електромагнітні поля, електричні струми різної конфігурації та електродинамічні сили. Результати досліджень дають підставу вважати, що на засадах керування механічними властивостями металевих сплавів і зварних з'єднань із застосуванням електрофізичних явищ можуть базуватися нові технології оброблення зварних конструкцій [1, 2].

Метою роботи є аналіз перспективних технологій покращення механічних характеристик і напруженого стану металевих сплавів і зварних з'єднань, які базуються на застосуванні електромагнітних полів та їх похідних (електродинамічна сила тиску, вихрові струми, ударні хвилі тощо).

Високовольтний імпульсний розряд у рідині, що проводить струм, використовується в промис-

ловій технології електрогідроімпульсного оброблення як джерело динамічного тиску, під дією якого матеріали, що обробляються, можуть змінювати розміри, структуру та механічні характеристики. Таке оброблення є впливом на об'єкт динамічного навантаження, яке ініціюється високовольним електричним розрядом імпульсного електричного струму у водному середовищі. Це – циклічний процес, який характеризується виділенням енергії в каналі розряду впродовж мікросекунд та супроводжується дією хвиль стиснення (які за певних умов трансформуються в ударні), потужних гідропотоків, кавітації, електромагнітних і термічних полів. Дослідження впливу зазначеного оброблення на напружено-деформований стан зварних з'єднань показали, що воно зменшує напруження розтягу в зварних конструкціях до 90 % [3]. Але технології такого оброблення високовольним електричним розрядом не знайшли широкого застосування у металообробленні, що

Лобанов Л.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>, Пашин М.О. – <http://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Тодорович Н.Л. – <http://orcid.org/0000-0002-3872-5790>, Сизоненко О.М. – <http://orcid.org/0000-0002-8449-2481>, Кондратенко І.П. – <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>, Чопик В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>, Карлов О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>

© Л.М. Лобанов, Л.І. Ниркова, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, О.М. Тимошенко, Н.Л. Тодорович, О.М. Сизоненко, І.П. Кондратенко, В.В. Чопик, О.М. Карлов, 2025

пов'язано з низькою продуктивністю процесу та значною метало- і енергоємністю обладнання.

Перспективним є застосування електрогідроімпульсного оброблення високовольтним електричним розрядом із використанням вуглеводневої рідини (замість води) для виробництва полідисперсних сумішей, що містять наночастинки з особливими властивостями, які застосовуються для легування металу шва зварних з'єднань. Такий варіант оброблення дозволяє здійснювати енергоефективний спосіб подрібнення металевих сплавів – розрядноімпульсну підготовку порошків шляхом використання у дисперсній системі «рідина–порошок» високовольтного електричного розряду. Його циклічна дія створює можливість тонкого подрібнення хвилями тиску внаслідок формування великої кількості дефектів у порошок, що сприяє зниженню енергії руйнування кристалів, утворенню великої кількості активних центрів і полегшує хімічну взаємодію між елементами системи в умовах динамічного навантаження. Використання вуглеводневої рідини в якості робочого середовища в умовах такого оброблення сумішей порошків дозволяє не тільки виключити їх окислення, але й створити термодинамічні умови для піролізу газу з утворенням твердофазного вуглецю, який здатен вступати в реакції карбідизації з частинками порошків, утворюючи наноструктурні зміцнюючі фази [4, 5].

Для електрогідроімпульсного оброблення високовольтним електричним розрядом [4, 5] використовують спеціалізоване обладнання, до складу якого, окрім джерела живлення, входить камера – ємність, де відбувається процес подрібнення порошків і яка має витримувати значні динамічні та термічні навантаження (рис. 1).

Для дослідження ефективності застосування полідисперсних сумішей, отриманих зазначеним обробленням, виконували легування металу зварного шва сплавами на основі Al та Ni, у розплави яких вводили порошки.

Введення 0,01 мас. % модифікатора Ti–TiC, синтезованого цим обробленням порошку Ti у газі та брикетованого за допомогою іскрового плазмового спікання, дозволило зменшити розмір зерна з 1...2 до 0,2...0,6 мкм в усіх модифікованих зразках жароміцного сплаву CM88Y на основі Ni [6]. За таких умов границя міцності на розрив при температурі 900 °C та довготривала міцність зросли на 20 %. Це свідчить про перспективність використання металевих порошків після оброблення високовольтним електричним розрядом для модифікації литої структури зварних швів конструкцій із нікелевих сплавів, які працюють в умовах підви-

щених температур, а також про вплив модифікатора системи Ti–Al–C після відповідного синтезу на подрібнення структури та покращення властивостей зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АК7_{пч} (А357) для корпусних деталей судових двигунів [7].

Полідисперсні суміші, отримані із застосуванням високовольтного електричного розряду, застосовуються в складі шихти порошкових дротів для дугового наплавлення. Це спрощує процес введення порошку в зварювальну ванну в фазі переносу рідкого металу присадки. Визначено позитивний вплив мікродобавок модифікатора системи Ti–TiC на експлуатаційні властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС. Модифікуючи порошки системи Ti–TiC отримували шляхом зазначеного оброблення в газі порошок Ti. Модифікування наплавленого металу карбідами Ti в кількості $\approx 0,01$ % не погіршує якості формування наплавлених валиків і відшарування шлакової кірки. Введення мікродобавок карбідів Ti у кількості 0,01 % до наплавленого металу призводить до збільшення його жаро- та зносостійкості в умовах підвищених температур на 15...50 % залежно від типу використаної модифікуючої добавки [8]. Проведено порівняння впливу модифікуючих добавок бору та карбідів титану, введених в однаковій кількості в шихту порошкового електродного дроту ПП-Нп-25X5ФМС, на структуру та властивості наплавленого металу. Показано, що введення добавок обох типів модифікаторів у кількості 0,01 % суттєво впливає на структуру наплавленого металу, а їх вплив на структуру – різний. Встановлено, що модифікування бором призводить до суттєвого зменшення розмірів кристалітів, перерозподілу неметалевих включень і підвищення мікротвердості металу. Введення мікродобавок

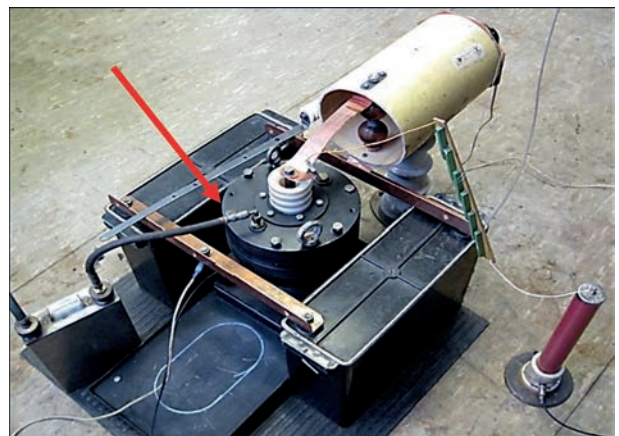


Рис. 1. Зовнішній вигляд обладнання для електрогідроімпульсного оброблення високовольтним електричним розрядом, де стрілкою вказано камеру, в якій відбувається подрібнення порошків [6]

карбідів титану в зварювальну ванну впливає на кінетику протікання кристалізації металу, завдяки чому відбувається усунення стовпчастої структури кристалітів і перетворення її на коміркову. Показано, що завдяки зазначеним змінам структури підвищуються зносостійкість і термостійкість металу, наплавленого із застосуванням обох типів модифікаторів [9].

Отримані результати сприяють покращенню характеристик матеріалів для наплавлення деталей спеціальної техніки, яка працює в умовах абразивного зношування та циклічних термомеханічних навантажень. Таким чином, застосування полідисперсних сумішей, отриманих високовольтним електричним розрядом у вуглеводневій рідині, створює новий напрямок оптимізації механічних властивостей наплавлених елементів конструкцій.

На базі результатів досліджень у галузі матеріалознавства встановлене явище підвищення пластичності металу за рахунок його активного навантаження в момент проходження (по металу) імпульсу електричного струму високої щільності j ($j \geq 1$ кА/мм²). Явище названо електропластичним ефектом, а ініційована ним деформація – електропластичною [10]. Практичне використання цього ефекту відкрило нові можливості для технологій металооброблення та зварювання [11–13]. Супутній нагрів одночасно з обробленням імпульсним електричним струмом ($j \geq 1$ кА/мм²) зразків конструкційної сталі, які попередньо були піддані одночасному пружному розтягу, призводить до релаксації напружень розтягу [12]. Проте в умовах нагрівання без застосування такого струму напруження розтягу в зразку після охолодження до кімнатної температури поверталися до початкового рівня. Ефект від дії імпульсів зменшувався зі зростанням їх кількості. З позицій електронно-дислокаційної взаємодії це пояснюється тим, що при одиничному імпульсі струму він діє на матеріал зі значним дислокаційним потенціалом. В умовах багаторазового впливу імпульсів електричного струму попередні імпульси виводять із релаксаційних процесів частину дислокацій, і електропластична деформація як результат електропластичного ефекту – знижується [13].

Зміна полярності імпульсів струму також впливає на прояв зазначеного ефекту, а за однакової їх амплітуди (при дослідженні навантаженого зразка) біполярні імпульси викликають меншу релаксацію (стрибок) напружень, ніж монополярні [14], оскільки імпульси електричного струму різної полярності, ініціюючи рух дислокацій у протилежних напрямках, протидіють один одному й резуль-

туюча їх дії менша, ніж в умовах монополярних імпульсів електричного струму. Їх вплив на метал відбувається в області пластичної деформації, що супроводжується скиданням деформуючого зусилля, а в області пружної деформації електропластичний ефект не спостерігається. У [15] розглянуто механізм, за якого релаксація напружень можлива в пружній області навантажень і обумовлена дією імпульсів струму. У [16] було розроблено методику визначення частини енергії імпульсів струму ІЕС, яка витрачається на роботу електропластичної деформації.

На основі результатів досліджень електромагнітної дії імпульсного струму на механічні характеристики металів і сплавів розроблено технологічні процеси металооброблення. Зміна тривалості й енергії такого струму та імпульсного електромагнітного поля призводить до активації спектру дислокаційних, фазових та інших фізичних процесів, тобто з'являється можливість керувати механічними характеристиками металів і сплавів. Обидві електромагнітні дії, що реалізовані в різних технологіях металооброблення, викликають структурні зміни в металах і сплавах [17–19], які впливають на їх механічні характеристики. Зазначається підвищення зносостійкості інструменту [20], корозійної стійкості [21–23], зниження концентрації напружень [24], ліквідація тріщин втоми, продовження ресурсу деталей із легких і спеціальних сплавів [25]. Встановлено, що за оптимальних значень параметрів імпульсного електричного струму підвищується часовий опір відриву матеріалу, границя витривалості та довговічності без зниження пластичних властивостей матеріалу [26].

Аналізуючи вищенаведене, слід зазначити, що дії імпульсного електричного струму та імпульсного електромагнітного поля можуть застосовуватись для покращення механічних характеристик і продовження ресурсу зварних з'єднань, на які також поширюються результати [17–26], отримані для металів і сплавів.

Дослідження особливостей релаксації напружень у металах і сплавах, спричинених обробленням імпульсами електричного струму та імпульсним електромагнітним полем, є перспективним напрямком інженерної практики керування залишковими напруженими станами зварних конструкцій. Досліджували вплив імпульсного поля на зниження залишкових напружень стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6. Використовували систему із двох плоских індукторів, жорстко закріплених на одній вертикальній осі на зовнішній і зворотній поверхнях зварного

шва. Зварне з'єднання, що обробляється, система індукторів і генератор імпульсного поля (ємнісний накопичувач енергії) входять до складу розрядного контура [27]. Проведені дослідження показали можливість зниження зварювальних напружень до 30 % за умов впливу імпульсного електромагнітного поля. Незначна ефективність даної схеми оброблення пов'язана з нераціональним розташуванням індукторів, за якого вектори сили електромагнітного тиску (які ініційовано дією цього поля) на метал шва з обох боків пластини діють у напрямку назустріч один одному. Це призводить до взаємної анігіляції тиску на метал шва, а релаксація напружень відбувається виключно за рахунок електропластичної деформації за умови $j \geq 1$ кА/мм², яку дотримано у [27]. Рациональнішу схему з одним плоским індуктором і екраном із ферромагнітного матеріалу (диск зі сплаву АМг6), що розташовані на одній осі відповідно з обох боків зразка зі стиковим швом, описано в [28]. Екранування металу шва в процесі оброблення імпульсним електромагнітним полем забезпечує (за рахунок зростання скін-шару в металі зразка за певної частоти імпульсного струму) збільшення об'єму середовища, яке проводить струм. Оскільки сила тиску прямо залежить від об'єму середовища, то його збільшення (із застосуванням екрану) сприяє трикратному зростанню сили (у порівнянні з обробленням імпульсним електромагнітним полем без екрану) за сталих значень параметрів режиму оброблення. Це забезпечує зниження залишкових зварювальних напружень розтягу до 90 % при восьмикратному зменшенні переміщень точок поверхні зразка після оброблення.

Вплив імпульсного електромагнітного поля на рівень залишкових напружень у зварних і наплавлених зразках із низьковуглецевих сталей, що базується на інтенсифікації динамічного ефекту магнітострикції [29], забезпечив зниження напружень до 40 %.

Результати досліджень впливу цього поля на зміну залишкових зварювальних напружень показані в [30]: залишкові напруження розтягу в зразках зварних з'єднань зі сталі Ст2пс знижуються на 3...25 %, і відбувається рівномірніший розподіл α -фази за об'ємом обробленого металу.

Порівняння ефективності дії оброблення імпульсним електромагнітним полем на залишкові напруження у зварних з'єднаннях із феро- і ферромагнітних матеріалів показало, що його дія на перші менш впливова. Отримані результати можна пояснити тим, що в умовах оброблення імпульсним електромагнітним полем ферромагнітних ма-

теріалів електромагнітна сила тиску витрачається не тільки на релаксацію напружень, а й на магнітопружну взаємодію міждоменних границь (стінок Блоха) з дислокаціями [13, 31]. За такого оброблення зварних з'єднань із ферромагнітних матеріалів доменна структура відсутня, електромагнітна сила тиску витрачається виключно на релаксацію напружень.

Спільне використання електроімпульсних і механічних впливів для оброблення зварних конструкцій з метою продовження їх ресурсу слугує базою для створення такого методу оброблення зварних з'єднань як електродинамічне [32]. Воно базується на ініціюванні електродинамічних сил, що виникають при проходженні в матеріалі імпульсного електричного струму за умови $j \geq 1$ кА/мм². За електродинамічного оброблення зварне з'єднання піддається об'ємному електродинамічному впливу, який характеризується спільним протіканням електроімпульсного і динамічного процесів, їх синергія в зоні оброблення ініціює релаксацію зварювальних напружень (згідно з механізмом електропластичної деформації) та диспергування структури металу.

Метод електродинамічного оброблення знайшов широке визнання в інженерній практиці для усунення місцевих зварювальних деформацій типу «бухтина» [33]. Досліджували вплив схем оброблення зовнішньої поверхні бухтин, таких як «точкова», «концентричних кіл», «спіральна». Доведено, що найменш ефективною є «точкова», а найбільш ефективною – «концентричних кіл» або «спіральна», які дозволяють повністю усувати даний дефект. Порівняльний аналіз показав, що енергетичні витрати на усунення бухтин таким методом суттєво нижчі, ніж за термічного правлення.

Розвиток зазначеного вище методу для корегування місцевих деформацій типу «бухтина» при застосуванні схеми «концентричних кіл» розглянуто також у [34]. Обладнання для його реалізації має електромеханічний електродний пристрій та джерело живлення імпульсним електричним струмом. Пристрій для електродинамічного оброблення виконаний у вигляді принаймні однієї пари ідентичних механізмів, кожен з яких містить електромеханічний електрод-індентор (рис. 2). Пристрої жорстко пов'язані між собою через притискний механізм фіксації інденторів, кожен з яких обладнаний ультразвуковим вібратором, що з'єднаний зі спільним джерелом живлення.

Удосконалений метод електродинамічного оброблення може бути застосований, наприклад, для технологічного забезпечення поточного ви-

робництва полотниць обшивки зварних конструкцій корпусів суден. У процесі правлення оброблення виконують синхронно принаймні на одній парі ділянок поверхні бухтини, а також – сумісно з ультразвуковим випромінюванням, що сконцентроване в обох зонах оброблення. Схему елементів показано на рис. 2, де наведено конструкцію електромеханічної частини пристрою з орієнтацією на усунення місцевих деформацій типу «бухтина» тонкостінних елементів зварних конструкцій. Поєднання електродинамічних і механічних (ультра звукових) впливів дозволяє досягнути максимальної ефективності процесу електродинамічного оброблення зварних з'єднань.

Враховуючи результати [14], де показано, що супутній підігрів стимулює релаксацію напружень за електроімпульсного оброблення тонких стрижнів зі сталі, перспективними є дослідження ефективності електродинамічного оброблення остигаючого зварного шва, яке виконують впродовж термодформаційного зварювального циклу.

На засадах [12–16] розроблено гібридну технологію «автоматичне зварювання + електродинамічне оброблення», яка дозволяє знизити енергоємність процесу оброблення, зменшити робочий час виготовлення металевої конструкції і одночасно підвищити її якість [35]. Спосіб модернізації процесу електродинамічного оброблення металу зварного з'єднання відрізняється тим, що шов з боку кореня оснащують ковзним рухомих контактом зворотної клеми розрядного кола від джерела живлення імпульсного електричного струму. У процесі виконання зварного з'єднання переміщення рухомого контакту є співвісним із розташуванням контактної зони електрода-індентора. Пристрій для здійснення модернізованого способу має

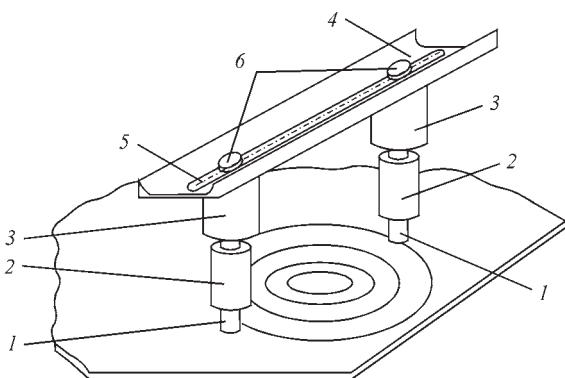


Рис. 2. Конструкція пристрою для усунення місцевих деформацій типу «бухтина» площинних елементів зварних конструкцій (гілки розрядного контура не вказано): 1 – рухомий електрод-індентор для електродинамічного оброблення; 2 – ультразвуковий збуджувач механічних коливань (магнітострикційного або п'єзоелектричного типу); 3 – електромагнітний привод; 4 – траверса взаємного позиціонування електродів; 5 – лінійний паз; 6 – гвинтовий притискач [34]

блок електродинамічного оброблення з електромеханічним електроодом-індентором і джерелом живлення імпульсного електричного струму (рис. 3). Розрядне коло для реалізації цього оброблення сумісно з процесом зварювання пальником 8 послідовно включає в себе рухомий індентор 2 і деталь 14, яка зварюється швом 1 з віддаленим розташуванням зворотної контактної клеми 9. Електромагнітна частина індентора 4 і його рухомий ударний механізм під'єднані до автономних джерел живлення імпульсного струму 5 і 6 відповідно, який вмикається на електроді синхронно з сигналами від рухомого ударного механізму. Пристрій містить стіл 15 з вибіркою матеріалу в зоні розміщення зварного шва 1 та закріпленою нижче поверхні стола вздовж лінії шва опорною траверсою з підпружиненим контактом повздовжнього повзуна 11, що має електричне з'єднання зі зворотною клемою джерела імпульсного живлення відповідного електричного струму ударного механізму індентора (клеми I–II). Зазначений механізм і пружний контакт повзуна мають жорсткі механічні з'єднання з механізмами синхронізації взаємного положення їх осей. Наведена модернізація методу електродинамічного оброблення забезпечує повне виключення ефекту іскрової ерозії поверхні матеріалу, що обробляється, а також можливість суттєвого підвищення ефективності оброблення на основі узгодження фазових характеристик імпульсних впливів в умовах застосування диференціатора (пристрій синхронізації) у джерелі живлення імпульсного електричного струму – тобто у джерелі імпульсного живлення (клеми III–IV).

Необхідною умовою реалізації даного способу є синхронізація періоду дії імпульсного електричного струму з часовим інтервалом реалізації імпульсів динамічного тиску на базі раціональної конфігурації розрядного контура, де імпульс струму рухливої частини електрода-індентора є керованим і надходить лише за сигналом про готовність його розповсюдження в металі зварного шва. Синхронізація сигналів здійснюється елементною базою за допомогою диференціатора 7. Випереджаюча дія імпульсу динамічного тиску забезпечує необхідний контактний тиск для проходження імпульсного електричного струму та виключає проявлення іскро-дугових ефектів. Таким чином, реалізація способу електродинамічного оброблення забезпечується конструкцією та складом обладнання відповідного пристрою. Механічне оснащення відповідає одному з можливих варіантів силової компоновки обладнання для даного оброблення з підтримкою функції стабілізації вза-

емного позиціонування контактних елементів розрядного кола.

Метод «електродинамічне оброблення + зварювання ТІГ» реалізовано в автоматизованому зварювальному комплексі (рис. 4, а), принципи побудови якого базуються на результатах [35]. Апробація методу підтвердила його ефективність для усунення залишкових напружень розтягу стикових з'єднань зі сплаву АМг6. Вихідні значення σ_x (вздовж шва) мембранних напружень (без електродинамічного оброблення) сягали до 100 МПа в центрі шва. Доведено, що якщо зазначене оброблення після зварювання (при $T = 20^\circ\text{C}$) забезпечувало в центрі шва утворення мембранних напружень стиску σ_x (вздовж шва) до -50 МПа, то після нього в процесі зварювання (при $T = 150^\circ\text{C}$) $\sigma_x = -100$ МПа [36].

Серед новітніх способів зовнішнього впливу на якість металовиробів активно розвивається дослідження дії імпульсного електромагнітного поля та постійних магнітних полів, що накладаються на розплав у процесі його тверднення під час отримання литих заготовок і деталей із неферромагнітних матеріалів, наприклад сплавів алюмінію. Визначено, що дія постійних магнітних полів сприяє еволюції їх структури, підвищенню спротиву корозійному ураженню. Механізм структуроутворення ґрунтується на проявах дії зазначених полів – відбувається зменшення структурних складових, зміна морфології інтерметалідних фаз, підвищен-

ня їх мікротвердості, зміна їх розмірів і конфігурації, які подібні до процесів затвердіння при високих швидкостях охолодження [37].

Рідкий метал, що є вмістом зварювальної ванни, при зварюванні плавленням за певних допущень подібний за властивостями (при значно меншому об'ємі) до металу при литті, тобто придатним для оброблення імпульсним електромагнітним полем і постійним магнітним полем. З урахуванням результатів [37] слід зазначити, що наведено вище оброблення остигаючого металу заднього фронту зварювальної ванни є доцільною для покращення залишкового напружено-деформованого стану та структури металу зварного з'єднання. Це призвело до створення відповідного методу оброблення зварних з'єднань упродовж термомодеформаційного зварювального циклу та гібридної технології «автоматичне зварювання + оброблення постійним магнітним полем» [38]. Даний метод доцільно застосовувати для зварних з'єднань із неферромагнітних металевих сплавів на основі Al, Mg, Ti, в яких відсутні доменні структури. Наслідком цього є більша за величиною сила електромагнітного тиску (у порівнянні з вуглецевими сталями), яку генерує постійне магнітне поле.

В якості інструменту керування структурою металу шва й напруженим станом зварного з'єднання перспективним з енергетичних міркувань є застосування імпульсного електромагнітного поля замість постійного із заданою частотою впливу на задній фронт зварювальної ванни. Використання імпульсного поля дозволяє суттєво підвищити енергію, і, як наслідок, – силу електромагнітного тиску на метал шва у порівнянні із застосуванням постійного поля. Генератори ІЕС, що побудовані на сучасній елементній базі силової електроніки, забезпечують частоту реалізації імпульсного електромагнітного поля $\leq 1/\text{с}$ [39, 40]. Частота його дії за стандартних швидкостей зварювання ТІГ $V_{\text{зв}} = 4$ мм/с за ефективністю співставна із впливом постійного магнітного поля. Розроблено математичну модель електрофізичних процесів в умовах дії імпульсного поля на неферромагнітні матеріали на основі Al та доведено його позитивний вплив на структуру й залишкові напруження зварних з'єднань зі сплаву АМг6 [41, 46]. На базі результатів [39–41, 46] створено автоматизований зварювальний комплекс (рис. 4, б), що реалізує гібридну технологію «оброблення імпульсним електромагнітним полем + зварювання ТІГ».

Перспективним напрямком для оброблення металевих сплавів і зварних з'єднань стало використання електроімпульсних технологій АОТs, що

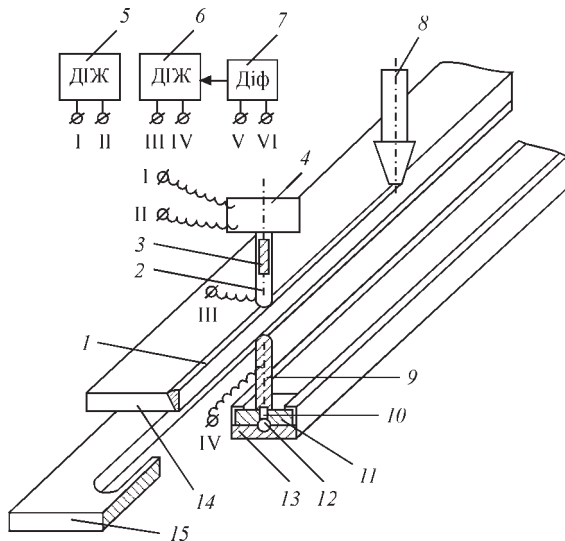


Рис. 3. Схема способу електродинамічного оброблення [35]: 1 – зварний шов; 2 – рухома частина індентора; 3 – датчик переміщення; 4 – електромагнітна частина індентора; 5 – джерело імпульсного живлення ДіЖ (клемми I і II) електромагнітної частини індентора; 6 – джерело імпульсного живлення ДіЖ (клемми III і IV) ударної частини індентора; 7 – диференціатор ДіФ (клемми V і VI); 8 – пальник зварювальний; 9 – контакт повзуна; 10 – пружина упорна; 11 – повзун; 12 – упор повзуна роликаний; 13 – траверса упорна; 14 – деталь, що зварюється; 15 – робочий стіл

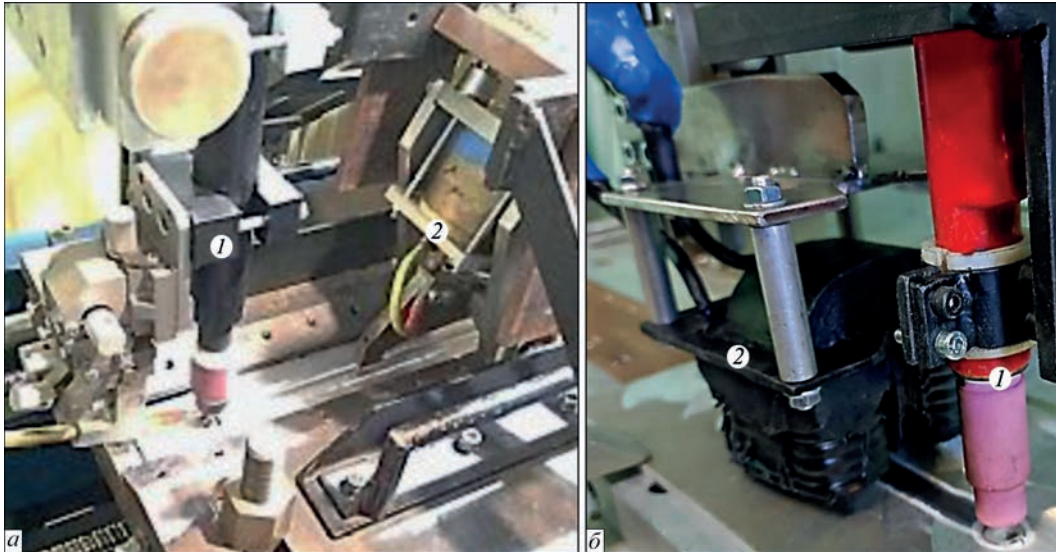


Рис. 4. Зовнішній вигляд обладнання для гібридних технологій зварювання: *a* – «зварювання TIG + електродинамічне оброблення» [36]: 1 – пальник TIG, 2 – електродна система для даного оброблення [36]; *б* – «зварювання TIG + оброблення імпульсним електромагнітним полем» [41]: 1 – пальник TIG, 2 – індуктор для даного оброблення» [41]

первинно розроблялися для технічного очищення водних розчинів [42]. Генерування імпульсів електричного струму в АОТs відбувається поблизу поверхні середовища, що обробляється, та використовується імпульсним бар'єрним розрядом, який діє на поверхню через діелектричний бар'єр.

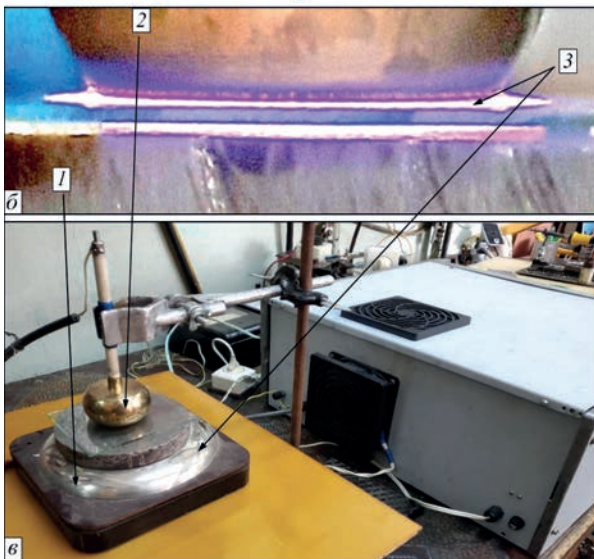
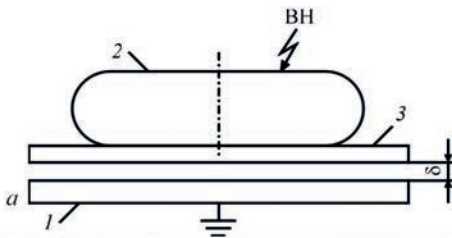


Рис. 5. Оброблення металевих сплавів імпульсним бар'єрним розрядом (ОІБР) [44]: *a* – схема оброблення; ВН – висока напруга від генератора імпульсів струму; 1 – метал, що обробляється; 2 – електрод; 3 – діелектричний бар'єр (кварцове скло); *б* – повітряний проміжок; *в* – процес оброблення конструкційної сталі; 1–3 відповідають рис. 5, *a*; *в* – апаратний комплекс для оброблення металів і зварних з'єднань

Генерування імпульсів електричного струму на поверхні металевих сплавів призвело до створення нового технологічного процесу – оброблення металів імпульсним бар'єрним розрядом (рис. 5) [43]. Він генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, що обробляється, і його застосування є новим підходом до оптимізації механічних властивостей високоміцних сталей для зварних конструкцій, який базується на електрофізичних процесах. У [44] досліджували зміцнення сталі 25ХГНМТ внаслідок дії на її поверхню такого розряду. На базі методу трансмісійної електронної мікроскопії встановлено, що значення твердості *HV* після оброблення імпульсним бар'єрним розрядом зростають з 420 до 505 кг/мм² і супроводжується загальним підвищенням щільності дислокацій та диспергуванням мікроструктури. Це позитивно впливає на механічні характеристики сталі 25ХГНМТ для зварних конструкцій, які працюють в умовах динамічних навантажень. Отримані результати відкривають нові можливості застосування оброблення імпульсним бар'єрним розрядом для еволюції структури металевих сплавів і зварних з'єднань.

На рис. 6 наведено структурну схему електрофізичних технологій на базі процесів із використанням імпульсного електромагнітного поля. Так, окремим напрямком є дослідження впливу оброблення імпульсним бар'єрним розрядом на ресурс металевих сплавів і зварних з'єднань, включаючи легкі та кольорові сплави й конструктивні сталі, з метою еволюції їх структури для підвищення твердості, регулювання напружених станів.

Перспективним є дослідження можливості застосування оброблення імпульсним бар'єрним

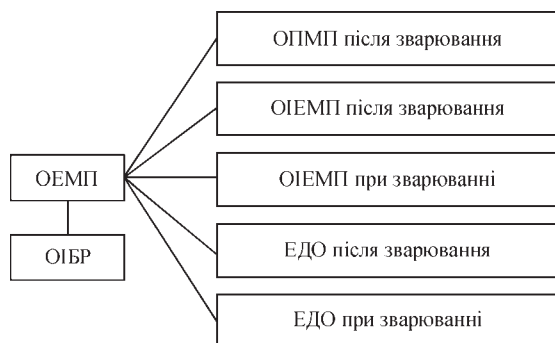


Рис. 6. Структура перспективних досліджень впливу оброблення магнітним полем (ОЕМП) на ресурс металевих сплавів і зварних з'єднань: ОМПМП – оброблення постійним магнітним полем; ОІЕМП – оброблення імпульсним магнітним полем; ЕДО – електродинамічне оброблення; ОІБР – оброблення імпульсним бар'єрним розрядом

розрядом для локальної неруйнівної оцінки залишкових напружених станів металів, сплавів і зварних з'єднань. Оброблення локальних ділянок (діаметром ≤ 1 мм) може бути альтернативою операції висвердлювання локальних отворів на поверхні металу, що є необхідною умовою застосування методу електронної спекл-інтерферометрії для визначення напружень [45]. Недоліком даної методики є те, що вона є умовно руйнівною. Це обмежує її використання на натурних відповідальних металевих конструкціях, що призначені для експлуатації і на яких виключені навіть мінімальні поверхневі точкові пошкодження.

Таким чином, використання спекл-інтерферометрії можливе тільки на зразках-свідках або конструкціях-імітаторах. У запропонованій методиці для релаксації напружень (замість висвердлювання отвору) може бути застосоване оброблення імпульсним бар'єрним розрядом локальної ділянки поверхні. Встановлення кореляційної залежності між спекл-картинами поверхні навколо обробленої ділянки та навколо висвердленого отвору дозволить використовувати метод електронної спекл-інтерферометрії в якості неруйнівного методу оцінки напружених станів на поверхні металевих зварних конструкцій.

Досвід дослідження впливу електромагнітних полів на метали та сплави доводить можливість застосування електрофізичних технологій для керування напруженим станом, поліпшення структури, трибологічних і механічних характеристик зварних з'єднань у конструкціях машинобудування, суднобудування та авіакосмічної промисловості.

Висновки

1. Проведено аналіз перспективних технологій покращення механічних характеристик і напруженого стану металевих сплавів і зварних з'єднань,

які базуються на застосуванні електромагнітних полів та їх похідних, таких як електродинамічна сила тиску, вихрові струми та ударні хвилі.

2. Доведено позитивний вплив мікродобавок модифікатора системи Ti–TiC, отриманого електрогідроімпульсним обробленням високоенергетичним розрядом, на експлуатаційні властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС.

3. Показано, що різні методи оброблення імпульсним електромагнітним полем сприяють зменшенню залишкових напружень зварних з'єднань. Доведено переваги такого оброблення металу шва в процесі зварювання у порівнянні з обробленням при кімнатній температурі.

4. Досліджено механізм поверхневого зміцнення сталі 25XГНМТ внаслідок її оброблення імпульсним бар'єрним розрядом. Доведено, що він сприяє підвищенню щільності дислокацій та диспергуванню мікроструктури, тобто позитивно впливає на механічні характеристики сталі. Розглянуто перспективи застосування імпульсного бар'єрного розряду для неруйнівного контролю залишкових напружених станів зварних з'єднань.

Список літератури

1. Razmyshlyaev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, 3, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.03.05>
2. Дубоделов В.І., Горюк М.С. (2018) Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві системи: світовий та український досвід. У кн. «Наука про матеріали: досягнення та перспективи». У 2-х т. Т. 2. Л.М. Лобанов та ін. (ред.). Київ, Академперіодика, сс.24–50.
3. Опара В.С., Резникова Л.Я., Юрченко Е.С., Петушков В.Г. (1984) Влияние жесткости сварных соединений на снижение остаточных напряжений при электрогидроимпульсной обработке. *Автоматическая сварка*, 7, 70–71.
4. Sizonenko, O., Vovchenko, A. (2014) Pulsed discharge technologies of processing and obtainment of new materials (Review). *Machines. Technologies. Materials*, 8(12), 41–44. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2014/12/41>
5. Липян Е.В., Сизоненко О.Н., Торпаков А.С., Жданов А.А. (2015) Термодинамический анализ гетерогенных химических реакций в системе «смесь порошков Fe–Ti–углеводородная жидкость» под воздействием высоковольтных электрических разрядов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць*, 51(1160), 59–65.
6. Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lypyan, E.V. et al. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Materials Science*, 56(2), 232–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>
7. Lobanov, L.M., Syzonenko, O.M., Holovko, V.V. et al. (2021) Pulsed-discharge treatment of the Al–Ti–C system modifier. *The Paton Welding J.*, 5, 24–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.04>
8. Lobanov, L.M., Ryabtsev, I.O., Pashchyn, M.O. et al. (2023) Wear resistance of titanium carbide-modified 25Kh5FMS deposited metal. *Strength of Materials*, 55(3), 469–474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00539-y>
9. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Pashchin, M.O. et al. (2023) Influence of different types of modifiers on the structure

- and properties of deposited metal of the type of 25Kh5MFS tool steel. *The Paton Welding J.*, **5**, 11–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.02>
10. Sprecher, A.F., Mannan, S.L., Conrad, H. (1986) Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, **34(7)**, 1145–1162. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90001-5)
 11. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы*. Москва, МГИУ.
 12. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. (2004) High-density pulse current-induced unsteady stress-strain state in a long rod. *Strength of Materials*, **36(4)**, 377–381. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34>
 13. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. Том 1. Прочность материалов и конструкций: серия монографий*. В.Т. Трошенко (ред.). Киев, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины.
 14. Троицкий О.А., Калымбетов П.У. (1981) Зависимость электропластического эффекта в цинке от длительности отдельных импульсов. *Физика металлов и металловедение*, **51(5)**, 1056–1059.
 15. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A., Olisov, A.N. (2006) Analysis of pulse current-induced tensile stress relaxation. *Strength of Materials*, **38(1)**, 84–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0019-4>
 16. Strizhalo, V.A., Novogrudskij, L.S. (1997) Determination of the electroplastic strain energy of metals. *Problemy Prochnosti*, **4**, 38–43. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0031108852&origin=recordpage>
 17. Morris, J.W., Fultz, B., Chan, J.W., Mei, Z. (1989) The influence of high magnetic fields on mechanical properties of metastable austenitic steels. *Физика низких температур*, **15(10)**, 1072–1080. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0032269>
 18. Guoyi Tang, Zhuohui Xu, Miao Tang et al. (2005) Effect of a pulsed magnetic treatment on the dislocation substructure of a commercial high strength steel. *Materials Science and Engineering: A*, **398(1–2)**, 108–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.003>
 19. Liping Ma, Wenxiang Zhao, Zhiqiang Liang et al. (2014) An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Materials Science and Engineering: A*, **609**, 16–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.100>
 20. Batainen, O., Klamecki B., Koepeke B. (2003) Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *J. of Materials Processing Technology*, **134(2)**, 190–196. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01002-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01002-6)
 21. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J. (2009) Influence of pulsed electric treatment on corrosion of structural metals. *Strength of Materials*, **4**, 387–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9142-3>
 22. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J., Mamuzic, I. (2010) Correlation between the corrosion resistance and the hardness scattering of structural metals treated with a pulse electric current. *Mater. Technol.*, **44(2)**, 99–102. <http://mit.imt.si/izvodi/mit102/babutsky.pdf>
 23. Bigyan Fang, Jinqiu Wang, Suhong Xiao (2005) Stress corrosion cracking of X-70 pipeline steels by electropulsing treatment in near-neutral pH solution. *J. Mater. Sci. Technol.*, **40(24)**, 6545–6552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1813-2>
 24. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. та ін. (1998) Влияние магнитного поля на релаксацию метастабильных структурных дефектов и пластичность кристаллов. *Вестник ТГУ*, **3(3)**, 273–274.
 25. Климов К.М., Бурханов Ю.С., Новиков И.И. (1985) Влияние электрического тока высокой проводимости на процесс пластического деформирования алюминия. *Проблемы прочности*, **6**, 44–47.
 26. Семашко Н.А., Крупский Р.Ф., Купов А.В. (2004) Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов. *Материаловедение*, **7**, 29–33.
 27. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. et al. (2011) Redistribution of residual welding stresses in pulsed electromagnetic treatment. *Strength of Materials*, **43(3)**, 326–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9300-2>
 28. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2021) Pulsed electromagnetic field effect on residual stresses and strains of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *Strength of Materials*, **53(6)**, 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00350-1>
 29. Yanli Song, Lin Hua (2012) Mechanizm of residual stress reduction in low alloy steel by a low frequency alternating magnetic treatment. *J. Mater. Sci. Technol.*, **28(9)**, 803–808. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(12\)60134-0](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60134-0)
 30. Царюк А.К., Скульский В.Ю., Моравецкий С.И., Сокирко В.А. (2008) Влияние электромагнитной обработки на остаточные сварочные напряжения в сварных соединениях углеродистых и низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*, **9**, 28–32.
 31. Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr-2Ni4A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **476**, 218–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.12.105>
 32. Lobanov, L., Kondratenko, I., Zhiltsov, A. et al. (2018) Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures. *Materials Performance and Characterization*, **7(4)**, 941–955. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
 33. Han Shanguo, Lobanov, L.M., Cai Detao et al. (2016) *Portable welding deformation control equipment and deformation treatment method thereof*. European patent of office. Priority number(s): CN201510142968 20150330. Bibliographic data: CN104722978 (B) – 2016-04-27 <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?C=C&NR=104722978B&KC=B&FT=D&ND=5&date=20160427&DB=&locale=en-EP>
 34. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Пашчин М.О., Волков С.С. (2021) *Спосіб усунення залишкових напружень і деформацій в зонах зварних з'єднань та пристрій для його здійснення*. Патент України винахід № 122829 від 06.01.2021.
 35. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Пашчин М.О., Волков С.С. (2021) *Спосіб усунення залишкових напружень і деформацій в зварних з'єднаннях та пристрій для його здійснення*. Патент України на винахід №122933 від 20.01.2021.
 36. Lobanov, L.M., Korzhik, V.M., Pashchin, M.O. et al. (2022) Deformation-free TIG welding of AMg6 alloy with application of electrodynamic treatment of weld metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.08.01>
 37. Dubodelov, V.I., Seredenko, Ye.V., Zatulovskiy, A.S., Seredenko, V.A. (2018) Increase of properties of aluminum alloys by the action of a permanent magnetic field on melting at solid state. *The Scientific Technical J. Metal Science and Treatment of Metals*, **24(4)**, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2018.04.003>
 38. Бобринский В.И., Родин Н.П., Фомичева Л.Ф., Юсупов Р.Ю., Глущенко В.А., Иголкин А.Ю (2006) *Способ сварки плавлением*. Патент №2288823, опубл.20.12.2006.
 39. Акинін К.П., Антонов О.С., Петухов І.С. та ін. (2010) *Побудова електромеханічних перетворювачів енергії підвищеної ефективності*. Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць, Вип. **26**, 3–12.
 40. Антонов О.С., Михальський В.М., Петухов І.С. та ін. (2012) Дослідження процесів в електромеханічних та напівпровідникових перетворювачах енергії. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць*, Вип. **32**, 5–19.
 41. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2025) Scientific principles of magnetic pulse treatment of welded joints in the process of fusion welding. In: *Welding and Related Technologies*, I.V. Krivtsun et al. (Eds), pp. 183–187. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518>
 42. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu et al. (2014) Review on electrical discharge plasma technology for wastewater.

- Chemical Engineering J.*, **236**, 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
43. Божко І.В., Зозулев В.І., Кобильчак В.В. (2016) SOS-генератор для електророзрядних технологій на основі імпульсного бар'єрного розряду. *Технічна електродинаміка*, **2**, 63–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.02.063>
 44. Божко І.В., Кондратенко І.П., Лобанов Л.М. та ін. (2023) Застосування імпульсного бар'єрного розряду для обробки поверхні пластин зі сталі марки 25ХГНМТ. *Технічна електродинаміка*, **1**, 76–80. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.076>
 45. Лобанов Л.М., Книш В.В., Пащин М.О. та ін. (2023) Неруйнівне визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях на базі поєднання ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.03>
 46. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2022) Stress-strain state of welded joints of AMg6 alloy after electrodynamic treatment during welding. *Strength of Materials*, **54(6)**, 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>
- ### References
1. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.03.05>
 2. Dubodelov, V.I., Goryuk, M.S. (2018) The use of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena to intensify the influence on metal systems: World and Ukrainian experience. In: *Science of Materials: Achievements and Prospects*. In: 2 Vol. Vol. 2. Ed. by L.M. Lobanov et al. Kyiv, Akadempriodyka, 24–50 [in Ukrainian].
 3. Opara, V.S., Reznikova, L.Y., Yurchenko, E.S., Petushkov, V.G. (1984) Influence of welded joint stiffness on reduction of residual stresses during electrohydroimpulse processing. *Avtomaticheskaya Svarka*, **7**, 70–71 [in Russian].
 4. Sizonenko, O., Vovchenko, A. (2014) Pulsed discharge technologies of processing and obtainment of new materials (Review). *Machines. Technologies. Materials*, **8(12)**, 41–44. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2014/12/41>
 5. Lipyanyan, E.V., Sizonenko, O.N., Torpakov, A.S., Zhdanov, A.A. (2015) Thermodynamic analysis of heterogeneous chemical reactions in the system «mixture of Fe–Ti powders–hydrocarbon liquid» under the influence of high-voltage electric discharges. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Tekhnika ta Elektrofizyka Vysokykh napruh: Coll.*, **51(1160)**, 59–65 [in Russian].
 6. Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lypyan, E.V., Zaiichenko, A.D. et al. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Mater. Sci.*, **56(2)**, 232–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>
 7. Lobanov, L.M., Syzonenko, O.M., Holovko, V.V. et al. (2021) Pulsed-discharge treatment of the Al–Ti–C system modifier. *The Paton Welding J.*, **5**, 24–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.04>
 8. Lobanov, L.M., Ryabtsev, I.O., Pashchyn, M.O. et al. (2023) Wear resistance of titanium carbide-modified 25Kh5FMS deposited metal. *Strength of Materials*, **55(3)**, 469–474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00539-y>
 9. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Pashchin, M.O. et al. (2023) Influence of different types of modifiers on the structure and properties of deposited metal of the type of 25Kh5MFS tool steel. *The Paton Welding J.*, **5**, 11–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.02>
 10. Sprecher, A.F., Mannan, S.L., Conrad, H. (1986) Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, **34(7)**, 1145–1162. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90001-5)
 11. Baranov, Yu.V., Troitsky, O.A., Avramov, Y.S. (2001) *Physical bases of electric pulse and electroplastic processing and new materials*. Moscow, MGIU [in Russian].
 12. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. (2004) High-density pulse current-induced unsteady stress-strain state in a long rod. *Strength of Materials*, **36(4)**, 377–381. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34>
 13. Strizhalo, V.A., Novogrudsky, L.S., Vorobyev, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account the influence of electromagnetic fields. Vol. 1. Strength of materials and structures: A series of monographs*. Ed. by V.T. Troshchenko, Kyiv, IPS [in Russian].
 14. Troitsky, O.A., Kalymbetov, P.U. (1981) Dependence of the electroplastic effect in zinc on the duration of individual pulses. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **51(5)**, 1056–1059 [in Russian].
 15. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A., Olisov, A.N. (2006) Analysis of pulse current-induced tensile stress relaxation. *Strength of Materials*, **38(1)**, 84–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0019-4>
 16. Strizhalo, V.A., Novogrudskij, L.S. (1997) Determination of the electroplastic strain energy of metals. *Problemy Prochnosti*, **4**, 38–43. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0031108852&origin=recordpage>
 17. Morris, J.W., Fultz, B., Chan, J. W., Mei, Z. (1989) The influence of high magnetic fields on mechanical properties of metastable austenitic steels. *Fizika Nizkikh Temperatur*, **15(10)**, 594–599. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0032269>
 18. Guoyi Tang, Zhuohui Xu, Miao Tang, Xihua Chen, Huihua Zhou, Anli Lu (2005) Effect of a pulsed magnetic treatment on the dislocation substructure of a commercial high strength steel. *Mater. Sci. and Engin.: A*, **398(1–2)**, 108–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.003>
 19. Liping Ma, Wenxiang Zhao, Zhiqiang Liang et al. (2014) An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Mater. Sci. and Engin.: A*, **609**, 16–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.100>
 20. Batainen, O., Klamecki B., Koepke B. (2003) Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *J. Mater. Proc. Technol.*, **134(2)**, 190–196. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01002-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01002-6)
 21. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J. (2009) Influence of pulsed electric treatment on corrosion of structural metals. *Strength of Materials*, **4**, 387–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9142-3>
 22. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J., Mamuzic, I. (2010) Correlation between the corrosion resistance and the hardness scattering of structural metals treated with a pulse electric current. *Mater. Technol.*, **44(2)**, 99–102. <http://mit.imt.si/izvodi/mit102/babutsky.pdf>
 23. Bigyan Fang, Jinqiu Wang, Suhong Xiao (2005) Stress corrosion cracking of X-70 pipeline steels by electropulsing treatment in near-neutral pH solution. *J. Mater. Sci. Technol.*, **40(24)**, 6545–6552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1813-2>
 24. Golovin, Yu.I., Morgunov, R.B., Zhulikov, S.E. et al. (1998) Influence of magnetic field on metastable structural defects relaxation and plasticity of crystals. *Vestnik TGU*, **3(3)**, 271–274 [in Russian].
 25. Klimov, K.M., Burkhanov, Y.S., Novikov, I.I. (1985) Effect of high conductivity electric current on the process of plastic deformation of aluminum. *Problemy Prochnosti*, **6**, 44–47 [in Russian].
 26. Semashko, N.A., Krupsky, R.F., Kupov, A.V. (2004) Acoustic emission during electric pulse deformation of titanium alloys. *Materialovedenie*, **7**, 29–33 [in Russian].
 27. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. et al. (2011) Redistribution of residual stresses in pulsed electromagnetic treatment. *Strength of Materials*, **43(3)**, 326–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9300-2>
 28. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2021) Pulsed electromagnetic field effect on residual stresses and strains of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *Strength of Materials*, **53(6)**, 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00350-1>
 29. Yanli Song, Lin Hua (2012) Mechanism of residual stress reduction in low alloy steel by a low frequency alternating

- magnetic treatment. *J. Mater. Sci. Technol.*, 28(9), 803–808. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(12\)60134-0](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60134-0)
30. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Sokirko, V.A. (2008) Influence of electromagnetic treatment on residual welding stresses in welded joints of carbon and low-alloyed steel. *The Paton Welding J.*, 9, 22–25.
 31. Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr-2Ni4A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 218–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.12.105>
 32. Lobanov, L., Kondratenko, I., Zhiltsov, A., Pashchin, N., Mikhodui, O. (2018) Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures. *Materials Performance and Characterization*, 7(4), 941–955. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
 33. Han Shanguo, Lobanov, L.M., Cai Detao et al. (2016) *Portable welding deformation control equipment and deformation treatment method thereof*. European Patent Office. Priority number(s): CN201510142968 20150330. Bibliographic data: CN104722978 (B) – 2016-04-27. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=C-N&N_R=104722978B&KC=B&FT=D&ND=5&date=20160427&DB=&locale=en_EP
 34. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Pashchyn, M.O., Volkov, S.S. (2021) *Method for eliminating residual stresses and deformations in welded joints and device for its implementation*. Patent for invention 122829, 06.01.2021 [in Ukrainian].
 35. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Pashchyn, M.O., Volkov, S.S. (2021) *Method for eliminating residual stresses and deformations in welded joints and device for its implementation*. Patent for invention 122933, 20.01.2021 [in Ukrainian].
 36. Lobanov, L.M., Korzhik, V.M., Pashchin, M.O. et al. (2022) Deformation-free TIG welding of AMg6 alloy with application of electrodynamic treatment of weld metal. *The Paton Welding J.*, 8, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/t.pwj2022.08.01>
 37. Dubodelov, V.I., Seredenko, Ye.V., Zatulovskiy, A.S., Seredenko V.A. (2018) Increase of properties of aluminum alloys by the action of a permanent magnetic field on melting at solid state. *The Sci. Technical J. Metal Science and Treatment of Metals*, 24(4), 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2018.04.003>
 38. Bobrinsky, V.I., Rodin, N.P., Fomicheva, L.F., Yusupov, R.Y., Glushchenko, V.A., Igolkin, A.Y. (2006) *Fusion welding method*. Patent 2288823 RF, publ. 20.12.2006 [in Russian].
 39. Akinin, K.P., Antonov, O.E., Petukhov, I.S. et al. (2010) Construction of electromechanical energy converters of increased efficiency. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky, NANU: Coll.*, Vol. 26, 3–12 [in Ukrainian].
 40. Antonov, O.E., Mikhalskiy, V.M., Petukhov, I.S., Shapoval, I.A., Chopyk, V.V. (2012) Investigation of processes in electromechanical and semiconductor energy converters. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NANU: Coll.*, Vol. 32, 5–19 [in Ukrainian].
 41. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2025) Scientific principles of magnetic pulse treatment of welded joints in the process of fusion welding. In: *Welding and Related Technologies*. Ed. by I.V. Krivtsun et al., 183–187. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518>
 42. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu et al. (2014) Review on electrical discharge plasma technology for wastewater. *Chemical Engineering J.*, 236, 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
 43. Bozhko, I.V., Zozuljov, V.I., Kobylchak, V.V. (2016) SOS-generator for the electric discharge technology used pulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2, 63–68 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tech-2016.02.063>
 44. Bozhko, I.V., Kondratenko, I.P., Lobanov, L.M. et al. (2023) Pulsed barrier discharge for treatment of surfaces of 25KhGNMT steel plates. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 1, 76–80 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tech-2023.01.076>
 45. Lobanov, L.M., Knysh, V.V., Pashchin, M.O., Kot, V.G. et al. (2023) Nondestructive evaluation of residual stresses in welded joints on the base of a combination of ultrasonic testing and speckle-interferometry. *Tekhnichna Diahnostyka ta Neruivnyy Kontrol*, 2, 22–27 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.03>
 46. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2022) Stress-strain state of welded joints of AMg6 alloy after electrodynamic treatment during welding. *Strength of Materials*, 54(6), 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>

INVESTIGATIONS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF TREATMENT OF METAL ALLOYS AND WELDED JOINTS BY ELECTROMAGNETIC FIELD (REVIEW)

L.M. Lobanov¹, L.I. Nyrkova¹, M.O. Pashchyn¹, O.L. Mikhodui¹, O.M. Tymoshenko¹, N.L. Todorovych¹, O.M. Syzonenko³, I.P. Kondratenko², V.V. Chopyk², O.M. Karlov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: svarka2000@ukr.net

²Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. 56 Beresteiskiy Ave., 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: dep7ied@ukr.net

³Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine. 43a Bohoyavlensky Ave., 54018, Mykolaiv, Ukraine.

E-mail: dioo@iippt.com.ua

An analysis of promising technologies for improving the mechanical characteristics and stressed states of metal alloys and welded joints based on the use of electromagnetic fields and their derivatives, such as electrodynamic pressure force, eddy currents, and shock waves, is carried out. The process of electrohydro-pulse treatment by a high-energy discharge (EPT HED EHDPD) with application of a hydrocarbon liquid for the production of polydisperse mixtures used for alloying the weld metal of welded joints as part of flux-cored wires, is considered. The positive effect of microadditives of the Ti-TiC system modifier, obtained by EPT HED, on the operational properties of the deposited metal of the 25Kh5FMS tool steel type was determined. It is shown that treatment with a pulsed electromagnetic field (PEMF) improves the residual stressed states of welded joints. New technological schemes for the application of electrodynamic treatment (EDT) of welded joints are considered. The advantages of these two treatments of the weld metal in the welding process in comparison with processing at room temperature are proved. The mechanism of surface hardening of 25KhGNMT steel as a result of its treatment with a pulsed barrier discharge (PBD) was investigated. It is proved that the PBD increases the dislocation density and refines the microstructure, which has a positive effect on the mechanical characteristics of steel. Prospects for its use for non-destructive testing of residual stressed states of welded joints are considered. 46 Ref., 6 Fig.

Keywords: welded joint, electromagnetic field treatment, electrodynamic treatment, residual stresses, fusion welding, surface hardening, titanium carbide, polydisperse mixtures, residual deformations, aluminum alloys, structural steels, dislocation density

Отримано 09.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 09.06.2025

Прийнято 29.09.2025

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ У ВУЗЛІ З'ЄДНАННЯ КОЛЕКТОРА З ПАТРУБКОМ ДУ1200 ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000 В РЕЗУЛЬТАТІ ЛОКАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

О.В. Махненко, О.Ф. Мужиченко, І.І. Прудкий, Н.Р. Басистюк

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

При обґрунтуванні продовження терміну безпечної експлуатації енергоблоків АЕС ВВЕР-1000 вузол приварювання колектора до патрубка Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000 є об'єктом підвищеної уваги з-за його схильності до утворення дефектів несущільності. З метою отримання уточненої інформації стосовно навантаженості цього вузла проведено математичне моделювання методом скінченних елементів кінетики формування залишкових напружень і пластичних деформацій в результаті локальної післязварювальної термообробки за режимом високого відпуску. Складна геометрія вузла та локальне розташування нагрівачів викликають під час термообробки значну нерівномірність нагріву, що може призводити до негативних наслідків, а саме, утворення високих залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах вузла з'єднання. Доведено, що осесиметрична 2D скінченно-елементна модель вузла з найменшою довжиною патрубка Ду1200 забезпечує достатню консервативність результатів у порівнянні з загальною 3D моделлю. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: парогенератор ПГВ-1000, зварне з'єднання № 111, локальна термообробка, залишкові напруження, пластичні деформації, математичне моделювання, повзучість

Вступ. За останні двадцять років при експлуатації енергоблоків ВВЕР-1000 на АЕС України в зварному вузлі з'єднання колектора з патрубком Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000, який входить до складу першого та другого контурів охолодження реактора, було багаторазово виявлено дефекти несущільності матеріалу [1, 2]. Для обґрунтування можливості експлуатації парогенераторів з такими дефектами в зоні зварного з'єднання № 111, принаймні до наступного планового-попереджувального ремонту, можуть бути застосовані сучасні підходи механіки руйнування конструкційних матеріалів з дефектами тріщиноподібної форми для прогнозування їхньої поведінки при різних режимах навантаження [2–6]. Для проведення таких розрахунків дуже важливо мати інформацію про навантаженість вузла приварювання колектора до патрубка Ду-1200 [7–10], у тому числі про залишкові напруження, пов'язані з технологією виготовлення або ремонту [11–13].

Експериментальне визначення залишкових напружень у товстостінних конструкціях діючого обладнання можливо або на зовнішніх поверхнях за допомогою стандартизованого методу тензометрії [14] чи лазерної спекл-інтерферометрії (ES-PI-ND метод) [15] при свердлінні отвору, або вимагає більш поглиблених досліджень модельного зразка в лабораторних умовах, наприклад методом нейтронної дифракції [16]. Доцільно також проводити скінченно-елементне моделювання розподілу залишкових напружень в об'ємі зварного вузла

[13, 17], яке повинне узгоджуватись з результатами експериментальних вимірювань.

Враховуючи актуальність проблеми пошкодження вузла зварного з'єднання № 111 для АЕС України, необхідним є визначення достовірного розподілу залишкових технологічних напружень у зазначеному вузлі з метою подальшого розрахункового обґрунтування його працездатності з виявленими в процесі експлуатації дефектами несущільності.

Конструкція, матеріали та технологія виготовлення вузла зварного з'єднання № 111.

На рис. 1 наведено схему вузла приварювання колектора до патрубка Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000. Патрубок Ду1200 парогенератора та колектор виготовляють зі сталі перлітного класу 10ГН2МФА. Зварне з'єднання виконують ручним або автоматичним зварюванням. Корінь зварного шва виконують вручну аргонодуговим зварюванням з присаджувальним дротом Св08Г2С. Висота кореневого проходу 6...8 мм. Заповнення основної частини шва виконують ручним зварюванням електродами ЦУ-7 або УОНИ-13/55 діаметром 4 або 5 мм, а при автоматичному зварюванні використовується дріт Св08ГСМТ і Св10ГН1МА діаметром 2 мм і флюс ФЦ-16 або АН-17.

З метою релаксації залишкових напружень, пов'язаних або зі зварюванням під час виготовлення, або з ремонтом виявлених під час експлуатації окремих дефектів зварного з'єднання № 111 (рис. 1), виконується технологічна операція локальної термообробки за режимом високого

Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Мужиченко О.Ф. – <https://orcid.org/0000-0002-4870-3659>

© О.В. Махненко, О.Ф. Мужиченко, І.І. Прудкий, Н.Р. Басистюк, 2025

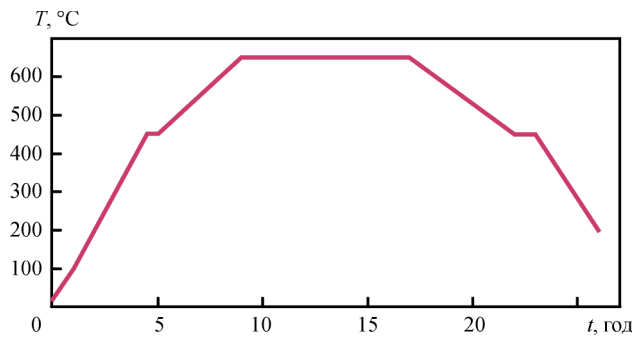


Рис. 3. Графік зміни температури термообробки за режимом високого відпуску

напруження розтягу. Розподіл осьової компоненти напружень на поверхні кармана з боку патруб-ка має характерний максимум в області гальтельного переходу на відстані близько 17 мм від дна кармана (рис. 4, а). Крім осьової компоненти, по товщині патрубка ближче до внутрішньої поверхні формуються високі окружні залишкові напруження розтягу (рис. 4, б). Підвищені напруження, що формуються внаслідок термообробки, з урахуванням їхньої концентрації в області дефектів, можуть бути причиною зародження тріщин.

Розробка математичної моделі визначення залишкових напружень після локальної термообробки вузла зварного з'єднання № 111. Для розрахунку залишкових напружень було побудовано загальну 3D скінченно-елементну модель вузла приварювання колектора до патрубка Ду1200 з урахуванням змінної довжини патрубка за окружною координатою ($H \approx 240 \dots 920$ мм) (рис. 5), а також спрощену осесиметричну 2D модель (рис. 6) з довжиною патрубка, яка дорівнює мінімальному значенню в реальній конструкції.

Кільцеві джерела нагріву (нагрівачі), що забезпечують локальну термообробку зварного вузла, моделювались відповідним тепловим потоком через поверхню нагріву за заданою програмою, як зазначено для режиму високого відпуску (рис. 3).

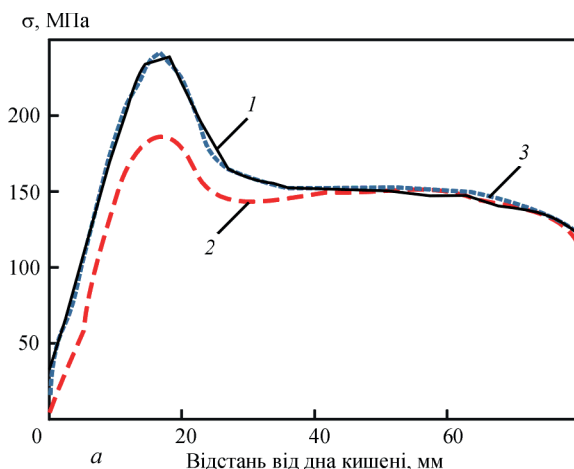


Рис. 4. Розподіл осьових σ_z (1), окружних σ_ϕ (2) та еквівалентних $\sigma_1 - \sigma_3$ (3) залишкових напружень на поверхні кармана з боку патрубка (а) та по товщині його стінки (б), починаючи від точки з максимальною напруженістю (за результатами двовимірних розрахунків [11])

Схеми 3D і 2D моделей вузла зварного з'єднання та скінченно-елементна сітка зображені відповідно на рис. 5 і 6. Залежності теплофізичних і механічних властивостей сталі 10ГН2МФА від температури наведені в табл. 1.

Кінетику температурних розподілів під час локальної термообробки визначали шляхом послідовного розв'язку рівняння нестационарної теплопровідності:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

де T – температура, °C; c – питома теплоємність, Дж/кг·°C; ρ – густина, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C).

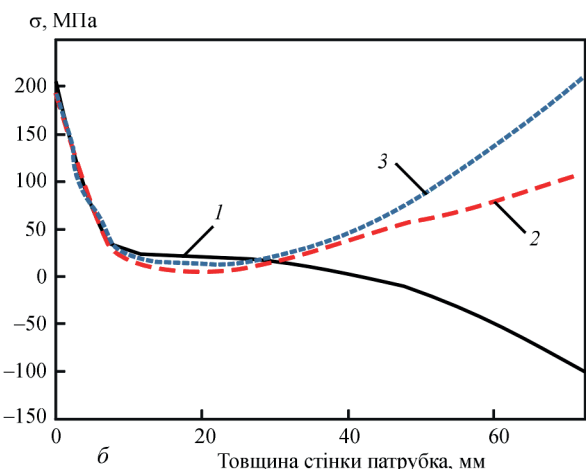
Особливістю моделі джерела нагріву при локальній термообробці є тепловиділення (тепловий потік) через контактні площини нагрівачів. При відсутності даних стосовно теплової потужності нагрівачів, змінний за часом тепловий потік на поверхні контакту нагрівачів у матеріал вузла з'єднання задавався через граничні умови контактного теплообміну з нагрівачем з температурою $T_H(t)$, як зазначено для режиму високого відпуску (рис. 3):

$$q_H(t) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -h_H(T_H(t) - T), \quad (2)$$

де h_H – коефіцієнт теплопередачі в матеріал з'єднання від нагрівачів, значення $h_H = 150$ Вт/(м²·°C) вибиралось із умови забезпечення швидкості нагріву металу зварного вузла 45...100 °C/год згідно з режимом високого відпуску.

Граничні умови на поверхнях моделей вузла з'єднання з урахуванням конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем задавалися у вигляді:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T_0 - T), \quad (3)$$



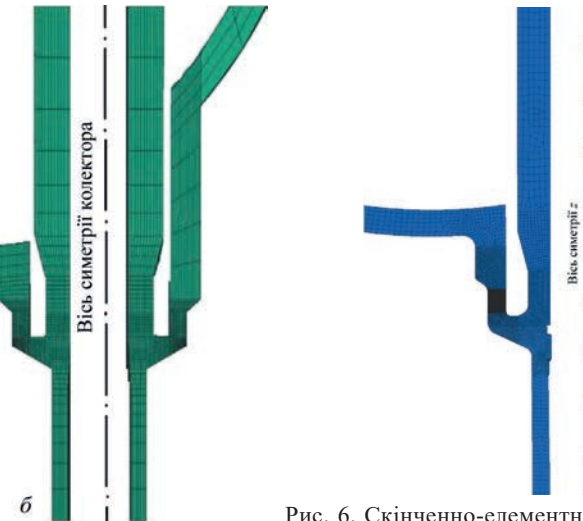
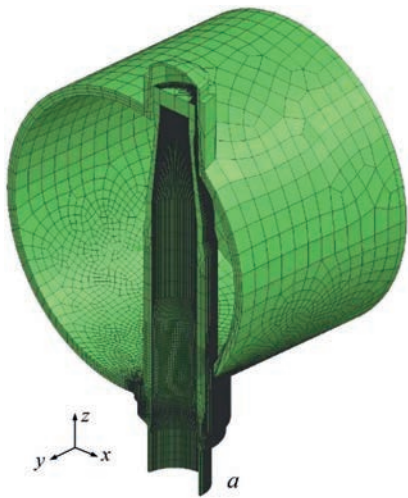


Рис. 5. Скінченно-елементна 3D модель зварного вузла № 111 парогенератора ПГВ-1000: а – загальний вигляд; б – поперечний переріз

Рис. 6. Скінченно-елементна осесиметрична 2D модель вузла зварного з'єднання № 111

де q – тепловий потік на поверхні елементів вузла; T_0 – температура навколишнього середовища; h – коефіцієнт теплопередачі з поверхні при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем. Зазвичай з поверхні в умовах природної конвекції на повітрі $T_0 = 20$ °С, $h = 15$ Вт/(м²·°С), при встановленні теплоізолюючих матеріалів можна прийняти $h = 2$ Вт/(м²·°С).

Модель термов'язкопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання передбачає, що тензор загальних деформацій є сумою пружних, пластичних і деформацій повзучості:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c \quad (i, j = x, y, z). \quad (4)$$

Компоненти тензорів напружень і пружних деформацій пов'язані законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi), \quad i, j = x, y, z, \quad (5)$$

де δ_{ij} – одиничний тензор ($\delta_{ij} = 0$, якщо $i \neq j$, $\delta_{ij} = 1$, якщо $i = j$); $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ –

модуль зсуву; $K = \frac{1-2\nu}{E}$ – податливість об'ємного стиснення; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; φ – функція вільних відносних видовжень, викликаних зміною температури:

$$\varphi = \alpha(T - T_0), \quad (6)$$

α – коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу.

Пластичні деформації пов'язані з напруженим станом рівнянням теорії пластичної неізотермічної течії та асоційованою умовою текучості Мізеса:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad i, j = x, y, z, \quad (7)$$

де $d\varepsilon_{ij}^p$ – прирощення тензора ε_{ij}^p , яке в даний момент часу t обумовлене історією деформування,

напруженнями σ_{ij} та температурою T ; $d\lambda$ – скалярна функція, яка визначається умовами течії:

$$d\lambda = 0, \text{ якщо } f = \sigma_i^2 - \sigma_T^2(T) < 0 \text{ або } f = 0 \text{ при } df < 0; \\ d\lambda > 0, \text{ якщо } f = 0 \text{ і } df > 0; \\ \text{стан } f > 0 \text{ неприпустимий};$$

σ_i – інтенсивність напружень; $\sigma_T(T)$ – границя текучості матеріалу при температурі T .

Для деформацій повзучості $d\varepsilon_{ij}^c$ використовується рівняння зв'язку у вигляді [5]:

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T)(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)dt, \quad (8)$$

де $\Omega(\sigma_i, T)$ – скалярна функція повзучості матеріалу при температурі T і рівні напруженості, що визначається інтенсивністю напружень σ_i .

Для даної задачі, коли при термообробці найбільш важливо враховувати деформації повзучості $d\varepsilon_{ij}^c$, оскільки від них істотно залежить процес релаксації напружень, функцію $\Omega(\sigma_i, T)$ раціонально вибирати на основі експериментів з деформування при підвищеній температурі зразків із даного матеріалу.

Відповідно функцію повзучості в загальному вигляді в залежності від температури матеріалу, починаючи з температури 550 °С і вище, можна апроксимувати типовою залежністю:

$$\Omega(\sigma_i, T) = A \cdot \sigma_i^n \cdot \exp\left(\frac{G}{T + 273}\right), \quad (9)$$

де A, G – константи, пов'язані з властивостями матеріалу.

Представлена модель повзучості при підвищених температурах є досить загальною та дозволяє простежити деформаційні процеси при термообробці не тільки під час витримки, але й під час нагріву та охолодження при температурі, наприклад для сталей, 550°С і вище. Ця модель може бути ефективною при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень при локальній термообробці зварних

Таблиця 1. Механічні та теплофізичні властивості сталі 10ГН2МФА в залежності від температури [5]

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	Границя текучості $\sigma_y(T), \text{МПа}$	Коефіцієнт тепло-провідності $\lambda, \text{Дж}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$	Об'ємна теплоємність $c_v, \text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	Коефіцієнт Пуассона $\mu, \text{б/р}$	Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha, 1/^\circ\text{C}$
100	2,01	488	0,375	3,88	0,25	1,14
200	1,96	466	0,370	3,98	0,25	1,18
300	1,90	443	0,360	4,21	0,25	1,22
350	1,87	415	0,355	4,44	0,25	1,25
400	1,85	380	0,350	4,76	0,25	1,30
500	1,78	355	0,337	5,10	0,25	1,34
600	1,70	300	0,320	5,80	0,25	1,39
700	1,60	200	0,305	7,35	0,25	1,42
800	1,50	60	0,285	8,10	0,25	1,47
900	1,35	40	0,280	5,60	0,25	1,52
1000	1,15	20	0,275	5,00	0,25	1,65
1100	1,00	20	0,270	4,90	0,25	1,70
1200	1,00	20	0,267	4,90	0,25	1,62

конструкцій або у випадку пічної термообробки за короткий час витримки, коли за об'ємом зварної конструкції або вузла не забезпечується рівномірне прогрівання до заданої температури витримки.

Коефіцієнти функції повзучості для основного матеріалу зварного вузла (сталі 10ГН2МФА) були визначені в [5] на основі обробки існуючих експериментальних даних [18] відповідно до ступеня релаксації залишкових напружень розтягу σ_{xx} за період витримки $t = 2$ год термообробки після зварювання пластин зі сталі 10ГН2МФА в залежності від температури відпуску $T = 550 \dots 700$ °C. У табл. 2 наведено результати розрахунку констант функції повзучості (8) з використанням експериментальних даних.

При математичному моделюванні напружено-деформованого стану в розглянутому вузлі навіть у випадку відсутності залишкових напружень перед локальною термообробкою доцільно враховувати процеси повзучості, оскільки під час локальної термообробки утворюються тимчасові температурні напруження, під дією яких у процесі довготривалої витримки при підвищених температурах можуть утворюватися значні пластичні деформації за механізмом повзучості.

Особливостями математичної моделі неізотермічного деформування матеріалу при локальному термічному відпуску вузла зварного з'єднання № 111 при максимальній температурі до 650 °C є: граничні умови, які відповідають вільному закріпленню моделі; відсутність структурних фазових змін і відповідних об'ємних ефектів; релаксація напружень за рахунок процесів миттєвої пластичності та температурної повзучості матеріалу, яка враховується функцією повзучості $\Omega(\sigma_p, T)$. Оскільки залишкові зварювальні напруження не враховуються, утворення та розвиток нових залишкових напружень у процесі локальної термообробки відбува-

Таблиця 2. Параметри функції повзучості $\Omega(\sigma_p, T)$ для сталі 10ГН2МФА в діапазоні температури $550 < T < 700$ °C [5]

n	$A, \text{МПа}^{-(n+1)} \cdot \text{год}^{-1}$	$G, ^\circ\text{C}$
5	$8,46 \cdot 10^{17}$	-66394

ється внаслідок значної нерівномірності нагріву за об'ємом зварного вузла. У процесі довготривалої витримки (9 год) термічні напруження частково релаксують за рахунок повзучості матеріалу і утворюються пластичні деформації, що може також впливати на рівень залишкових напружень.

Результати моделювання. На рис. 7 наведено розподіли максимальних температур у процесі витримки при проведенні локальної післязварювальної термообробки за режимом високого відпуску при $T = 650$ °C, отримані для 2D і 3D моделей вузла зварного з'єднання № 111. Із-за складної геометрії вузла нагрів за допомогою локально розташованих нагрівачів не забезпечує рівномірності розподілу температури в зоні зварного з'єднання в процесі термообробки (рис. 7).

З точки зору забезпечення цілісності зварного з'єднання № 111 за механізмом руйнування «корозія під напруженням» особливу важливість відіграють розподіли окружних і осьових залишкових напружень на внутрішній поверхні з'єднання. У результаті суттєво нерівномірний нагрів викликає утворення високих залишкових напружень (рис. 8). На внутрішній поверхні окружні напруження $\sigma_{\theta\theta}$ досягають рівня 350 МПа, а на зовнішній – до 300 МПа (рис. 8, а). Осьові напруження розтягу σ_{zz} на внутрішній поверхні досягають рівня 400 МПа, а на зовнішній поверхні напруження стиску – до -300 МПа (рис. 8, б). Радіальні напруження в зоні наплавленого металу незначні, але утворюється зона досить високих напружень розтягу до 100 МПа на внутрішній поверхні в зоні радіусного переходу кармана (рис. 8, в).

На рис. 9 наведено розрахункові розподіли залишкових напружень по товщині вузла зварного з'єднання № 111 після локальної термообробки (заводський режим) без моделювання зварюван-

ня ($T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, термін витримки $t = 8$ год), які отримані з використанням 2D і 3D моделей у порівнянні з існуючими даними [11]. Результати за осьовою компонентною σ_{zz} досить близькі за ха-

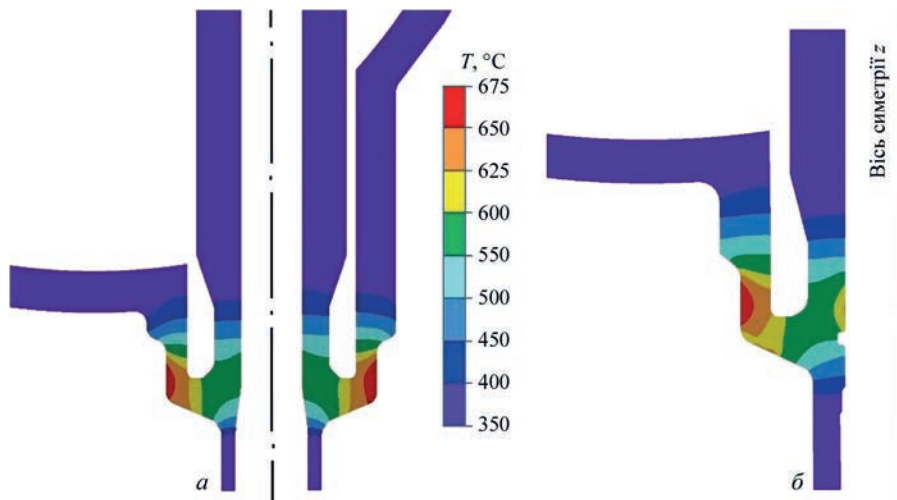


Рис. 7. Розподіли максимальних температур у процесі витримки при проведенні локальної термообробки за режимом високого відпуску при $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$: *a* – 3D модель, режим ремонтної термообробки; *б* – 2D модель, режим заводської термообробки

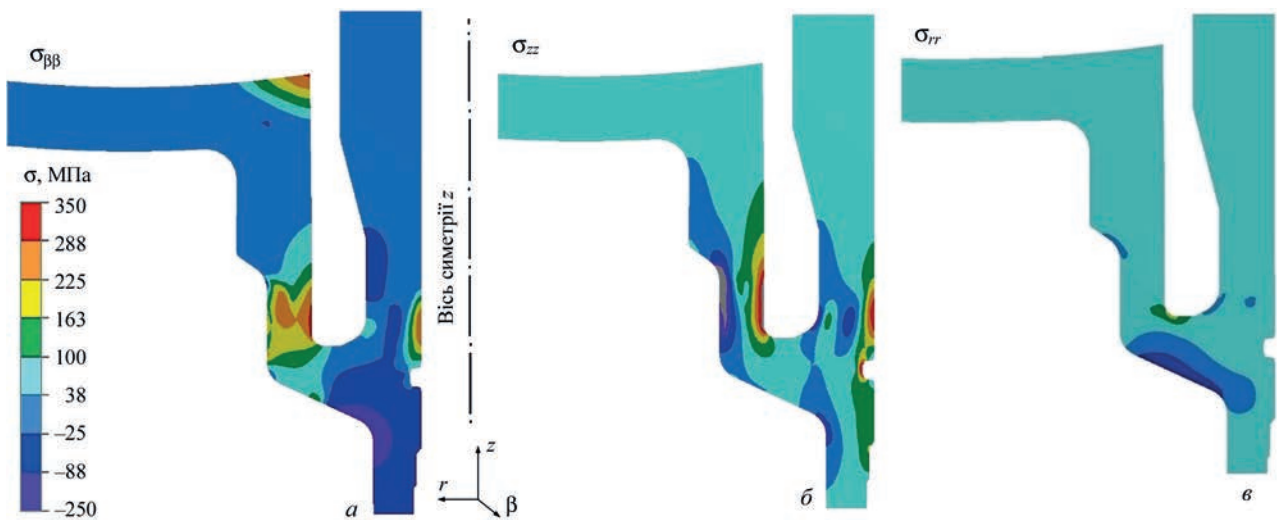


Рис. 8. 2D модель. Залишкові напруження в зварному з'єднанні № 111 після локальної термообробки (заводська) без моделювання зварювання ($T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, термін витримки $t = 8$ год.), МПа: *a* – окружні $\sigma_{\beta\beta}$; *б* – осьові σ_{zz} ; *в* – радіальні σ_{rr}

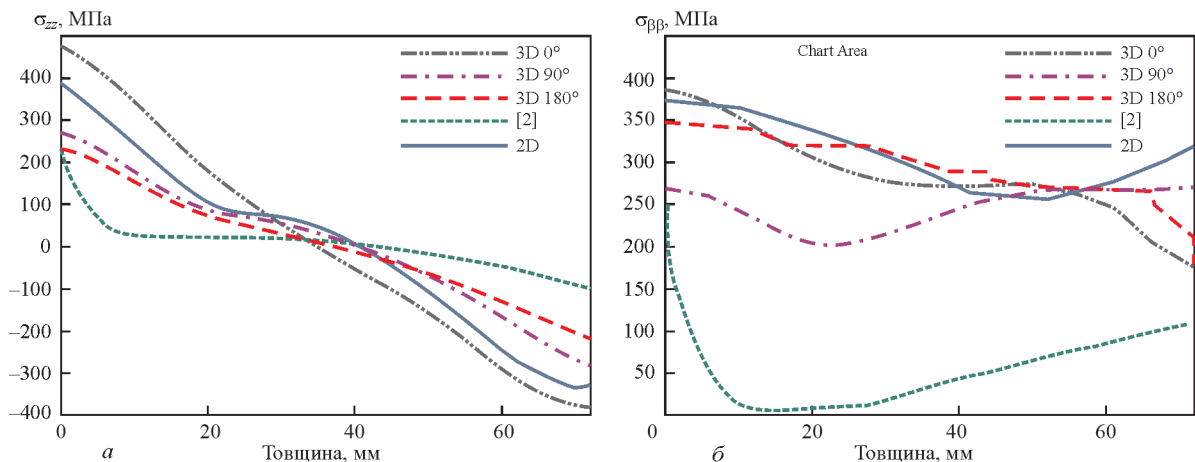


Рис. 9. Розподіл залишкових напружень по товщині зварного з'єднання № 111 після локальної термообробки (заводський режим) без моделювання зварювання ($T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, термін витримки $t = 8$ год): *a* – осьова компонента σ_{zz} ; *б* – окружна компонента $\sigma_{\beta\beta}$ (для 3D моделі кутова координата відраховується від найменшої довжини патрубку $\varphi = 0^\circ$, відповідно найбільша довжина патрубку відповідає $\varphi = 180^\circ$)

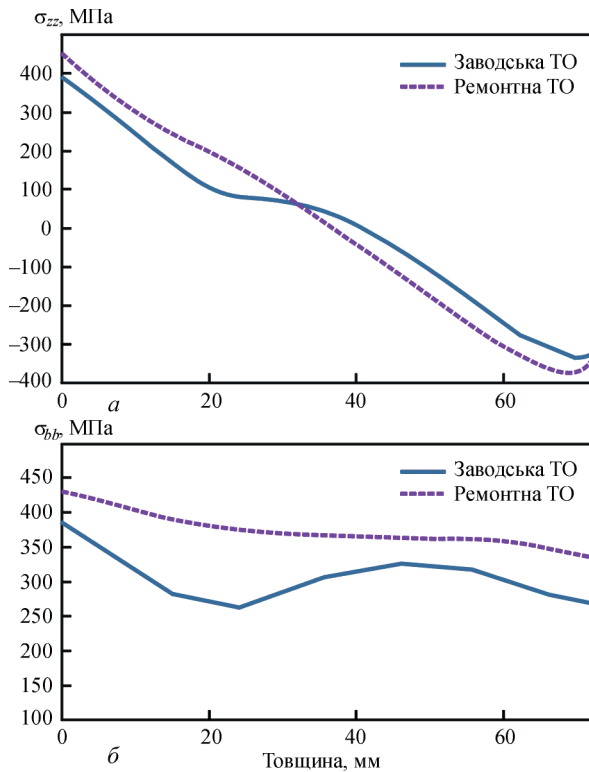


Рис. 10. Розподіл залишкових напружень по товщині зварного з'єднання № 111 після локальної заводської або ремонтної термообробки без моделювання зварювання ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, термін витримки $t = 8$ год): a – осьова компонента σ_{zz} ; b – окружна компонента $\sigma_{\phi\phi}$

рактором розподілу (рис. 9, a). Так, за отриманими даними на зовнішній поверхні з'єднання осьові залишкові напруження є стискальними, а на внутрішній поверхні – розтягувальними, але суттєво відрізняються за абсолютною величиною. За існуючими даними розтягувальні напруження досягають 230 МПа, за результатами 2D моделі – майже 400 МПа, а 3D модель дає різні значення в залежності від кутових координат ϕ , а саме, від 220 МПа в зоні з високою висотою патрубка ($\phi = 180^{\circ}$) до 480 МПа в зоні з низькою висотою патрубка ($\phi = 0^{\circ}$).

Що стосується окружної компоненти $\sigma_{\phi\phi}$ (рис. 9, b), то за існуючими даними залишкові напруження на внутрішній поверхні з'єднання є розтягувальними до 250 МПа, а потім різко падають майже до нульових значень. Залишкові напруження, які отримані з використанням 2D і 3D моделей, є розтягувальними по всій товщині з'єднання, але на внутрішній поверхні згідно з 2D моделлю – до 370 МПа, а згідно з 3D моделлю – від 270 МПа ($\phi = 180^{\circ}$) до 380 МПа ($\phi = 0^{\circ}$).

Представлені результати показали, що, по-перше, за існуючими даними [11] залишкові розтягувальні напруження на внутрішній поверхні зварного з'єднання № 111 після локальної термообробки є суттєво нижчими, ніж отримані в даній роботі з

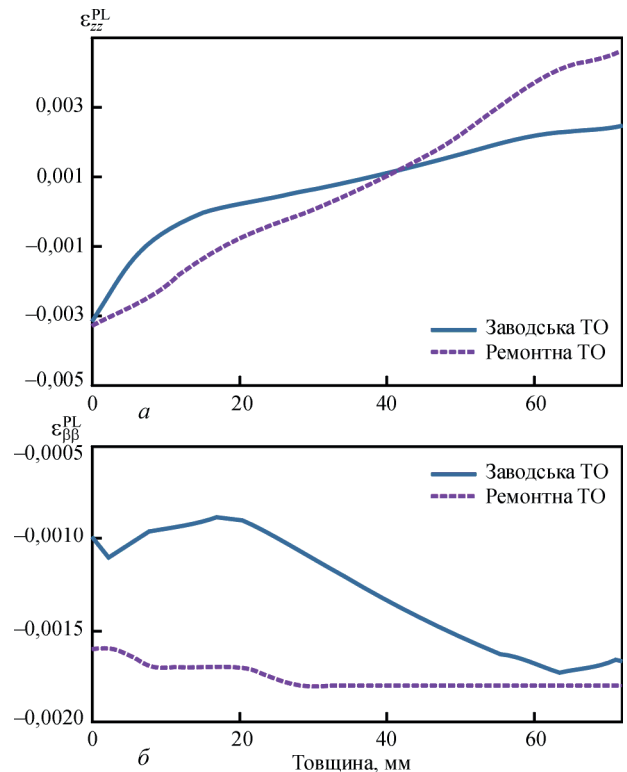


Рис. 11. Розподіл пластичних деформацій по товщині зварного з'єднання № 111 після локальної заводської або ремонтної термообробки без моделювання зварювання ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, термін витримки $t = 8$ год): a – осьова компонента ϵ_{zz}^P ; b – окружна компонента $\epsilon_{\phi\phi}^P$

використанням 2D і 3D моделей. По-друге, використання осесиметричної 2D моделі з малою довжиною патрубку забезпечує досить консервативні результати у порівнянні з 3D моделлю.

Ще одна задача, яка досліджувалась у роботі, – це відмінність залишкових напружень після проведення локальної термообробки за заводським режимом, коли є доступ до внутрішньої поверхні колектора, де можна розташувати додатковий нагрівач (рис. 2, a), і за ремонтним режимом, коли нагрівачі розташовані тільки з зовнішньої сторони вузла (рис. 2, b).

На рис. 10 і 11 наведено розрахункові результати, які отримані з використанням 2D моделі, щодо розподілів залишкових напружень і пластичних деформацій по товщині зварного з'єднання № 111 після локальної термообробки за заводським і ремонтним режимами термообробки без моделювання зварювання ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, термін витримки $t = 8$ год). Добре видно, що ремонтна локальна термообробка пов'язана з вищим рівнем залишкових напружень на внутрішній поверхні вузла, приблизно на 10...15 %.

Якщо припустити, що в процесі витримки під час термообробки залишкові зварювальні напруження значною мірою релаксують, то в процесі охолодження утворюються нові залишкові напруження. Особливо сильно це відбувається в металі

близько до внутрішньої поверхні, де утворюються досить високі (до 350...450 МПа) окружні та осьові залишкові напруження розтягу.

Представлені результати щодо вивчення ефективності технології локальної термообробки зварного з'єднання № 111 показали, що невдалий вибір або обмежені можливості щодо розміщення нагрівачів при локальній термообробці може призводити до негативних наслідків, а саме, утворення нових залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах зварного з'єднання.

Отримані результати прогнозування відносяться для всіх з'єднань № 111, як «гарячих», так і «холодних» колекторів, оскільки окремі відхилення, пов'язані з розмірами розробки, кількістю проходів, параметрами режиму зварювання та термообробки в межах розглянутого технологічного процесу помітно не впливають на кінцеві результати. Низька ефективність розглянутої технології післязварювальної термообробки та, можливо, навіть її негативний вплив на забезпечення цілісності зварного з'єднання № 111 свідчать про необхідність оптимізації технології локальної термообробки із залученням методів математичного моделювання.

Висновки

Результати математичного моделювання залишкового НДС вузла приварювання колектора до патрубку Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000 (зварне з'єднання № 111) у результаті локальної термообробки за режимом високого відпустку без урахування залишкових напружень після зварювання показали, що:

1. На внутрішній поверхні вузла в зоні зварного з'єднання № 111 внаслідок значної нерівномірності нагріву по товщині, а також процесів повзучості під час витримки при високій температурі утворюються досить високі залишкові напруження розтягу (до 350...450 МПа) як в окружному, так і в осьовому напрямку.

2. Осесиметрична 2D скінченно-елементна модель вузла з малою довжиною патрубка Ду1200 забезпечує достатню консервативність результатів у порівнянні з 3D моделлю, суттєво знижує вимоги до розрахункових ресурсів і може бути використана при розрахунках залишкових напружень після багатопрохідного зварювання та наступної локальної термообробки.

3. Локальна термообробка під час ремонту зварного з'єднання № 111 на АЕС пов'язана з вищим рівнем залишкових розтягувальних напружень на внутрішній поверхні з'єднання (приблизно на 10...15%), ніж під час виготовлення парогенератора в заводських умовах, коли є доступ до внутріш-

ньої поверхні колектора, де можна розташувати додатковий нагрівач.

4. Невдалий вибір або обмежені можливості щодо розміщення нагрівачів при локальній термообробці зварного з'єднання № 111 можуть призводити до негативних наслідків, а саме утворення нових високих залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах зварного вузла.

Список літератури

1. Воеводин В.Н., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С. и др. (2014) Идентификация несплошностей в металле сварного соединения корпуса парогенератора с коллектором на энергоблоках ВВЭР-1000. *Вопросы атомной науки и техники*, 4(92), 82–87.
2. Дуб А.В., Дурынин В.А., Разыграев А.Н. и др. (2014) Разработка методик ультразвукового контроля и определения работоспособности узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 36–51.
3. Харченко В.В., Чирков А.Ю., Кобельский С.В., Кравченко В.И. (2017) Совершенствование расчетного анализа напряженно-деформированного состояния и сопоставления разрушению узлов приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М АЭС. *Проблемы прочности*, 3, 5–20.
4. Махненко В.И., Маркашова Л.И., Махненко О.В. и др. (2012) Рост коррозионных трещин в конструкционной стали 10ГН2МФА. *Автоматическая сварка*, 8, 3–6.
5. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
6. Степанов Г.В., Широков А.В. (2014) Оценка кинетики трещины в сварном шве СШ № 111 соединения коллектора с патрубком корпуса парогенератора по ресурсу пластичности. *Проблемы прочности*, 3, 96–105.
7. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. (2003) Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения «горячего» коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС. *Проблемы прочности*, 5, 142–153.
8. Харченко В.В., Степанов Г.В., Кравченко В.И. и др. (2009) Перераспределение напряжений в узле соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при его нагружении после термообработки. *Проблемы прочности*, 3, 25–31.
9. Ходаковский А.А., Чирков А.Ю., Харченко В.В. (2013) Расчетный анализ напряженного состояния узла соединения «горячего» коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при сейсмическом воздействии. *Проблемы прочности*, 4, 125–134.
10. Банько С. (2012) Напряженный стан вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000м з каверною. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 67(3), 56–63.
11. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. (2006) Напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку корпуса парогенератора при локальной термообработке. *Проблемы прочности*, 6, 43–50.
12. Мужиченко О.Ф., Махненко О.В. (2019) Математичне моделювання залишкових напружень в вузлі приварювання колектору до патрубка Ду1200 парогенераторів ПГВ-1000. Збірка наук. праць міжн. конф. «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах PolyWeld 2019», 23–24 травня 2019, Київ, сс.82–83.
13. Махненко О.В., Міленін О.С., Мужиченко О.Ф. та ін. (2023) Математичне моделювання релаксації залишкових напружень при проведенні післязварювальної термообробки. *Автоматичне зварювання*, 6, 35–43. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.06.01>
14. (2015) ASTM E837-13a. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. ASTM International.
15. Lobanov, L., Pivtorak, V., Savitsky, V., Tkachuk, G. (2014) Technology and equipment for determination of residual stresses in

- welded structures based on the application of electron speckle-interferometry. *Materials Science Forum*, **768-769**, 166–173. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.166/>
16. Rogante, M. (2020) Inside welds: advanced characterization of residual stresses by neutron diffraction. *The Paton Welding J.*, **11**, 18–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.11.04>
 17. Senchenkov, I.K., Chervinko, O.P., Banyas, M.V. (2013) Modeling of thermomechanical process in growing viscoplastic bodies with accounting of microstructural transformation: *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Springer Ref., Vol. 6, 3147–3157.
 18. Гривняк І. (1984) *Сваруємость сталей*. Пер. со слов. Л.С. Гончаренко. Макаров Э.Л. (ред.). Москва, Машиностроение.
 8. Kharchenko, V.V., Stepanov, G.V., Kravchenko, V.I. et al. (2009) Redistribution of stresses in the header-PGV-1000 steam generator connector weldment under loading after thermal treatment. *Strength of Materials*, **41**, 251–256. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9130-7>
 9. Khodakovskii, A.A., Chirkov, A.Yu., Kharchenko, V.V. (2013) Calculation analysis of the stress-strain state of the collector-to-nozzle weld in the steam generator under seismic loading. *Strength of Materials*, **45**, 482–488. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9483-9>
 10. Banko, S. (2012) Stressed state of the collector-case connection unit of the PGV-1000M steam generator with a cavity. *Visnyk Ternopilskoho NTU*, **67(3)**, 56–63 [in Ukrainian].
 11. Stepanov, G.V., Kharchenko, V.V., Babutskii, A.I. (2006) Stress-strain state of the header-steam generator connector weldment induced by local thermal treatment. *Strength of Materials*, **38**, 595–600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0081-y>
 12. Muzhychenko, O.F., Makhnenko, O.V. (2019) Mathematical modeling of residual stresses in the collector to nozzle Du1200 welding unit of steam generators PGV-1000. In: *Proc. Papers of the Intern. Conf. on Innovative Technologies and Engineering in Welding and Related Processes PolyWeld 2019*, May 23–24, 2019, Kyiv, 82–83.
 13. Makhnenko, O.V., Milenin, O.S., Muzhychenko, O.F. et al. (2023) Mathematical modeling of residual stress relaxation during performance of postweld heat treatment. *The Paton Welding J.*, **6**, 32–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.06.05>
 14. (2015) ASTM E837-13a. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. ASTM International.
 15. Lobanov, L., Pivtorak, V., Savitsky, V., Tkachuk, G. (2014) Technology and equipment for determination of residual stresses in welded structures based on the application of electron speckle-interferometry. *Mat. Sci. Forum*, **768-769**, 166–173. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.166/>
 16. Rogante, M. (2020) Inside welds: Advanced characterization of residual stresses by neutron diffraction. *The Paton Welding J.*, **11**, 18–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.11.04>
 17. Senchenkov, I.K., Chervinko, O.P., Banyas, M.V. (2013) Modeling of thermomechanical process in growing viscoplastic bodies with accounting of microstructural transformation: *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Springer Ref., Vol. 6, 3147–3157.
 18. Hrivnak, I. (1984) *Weldability of steels*. Ed. by E.L. Makarov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

References

RESIDUAL STRESSES IN THE JOINT OF THE COLLECTOR TO THE DN1200 BRANCH PIPE OF THE PGV-1000 STEAM GENERATOR DUE TO LOCAL HEAT TREATMENT

O.V. Makhnenko, O.F. Muzhichenko, I.I. Prudkiy, N.R. Basistyk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

When assessing the extension of the service life of WWER-1000 NPP power units, the welded joint of the collector to the DN1200 branch pipe of the PGV-1000 steam generator is an object of increased attention due to its tendency to the formation of discontinuity defects. In order to obtain more detailed information regarding the loading of this welded joint, mathematical modeling of the kinetics of formation of residual stresses and plastic strains, as a result of local postweld heat treatment in the high-temperature tempering mode, was carried out using the finite element method. The complex geometry of the joint and the local arrangement of the heaters cause significant nonuniformity of heating during heat treatment, which can lead to negative consequences, namely, formation of high residual tensile stresses in the hazardous zones of the welded joint. It is proven that the axisymmetric 2D finite element model of the joint with the shortest length of the DN1200 branch pipe provides sufficient conservativeness of the results compared to the general 3D model. 18 Ref., 1 Tabl., 11 Fig.

Keywords: PGV-1000 steam generator; welded joint No. 111, local heat treatment, residual stresses, plastic strains, mathematical modeling, creep

Отримано 27.02.2025

Отримано у переглянутому вигляді 21.03.2025

Прийнято 15.09.2025

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МЕТОДУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГАФА ДЛЯ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІКРОСТРУКТУРИ ФЕРИТО-БЕЙНІТНИХ СТАЛЕЙ

В.В. Головка¹, О.О. Штофель^{1,2}, Д.Ю. Короленко¹

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

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: o.shtof@gmail.com

Високоміцні низьколеговані сталі є перспективним матеріалом для виготовлення зварних металоконструкцій, але їх поширення гальмується через підвищену схильність до утворення дефектів внаслідок зварювання. Тому фундаментальним аспектом розробки технології їх зварювання є розуміння того, як властивості металу змінюються під час процесу зварювання, та виявлення основних мікроструктурних характеристик, які пояснюють ці зміни. Дослідження високоміцних ферито-бейнітних сталей, які стосуються мікроструктурних характеристик і механічних властивостей, спрямовані на визначення загального кута розорієнтації структурних зерен та використовують метод дифракції зворотного розсіювання електронів (EBSD), який може бути реалізовано на електронних мікроскопах, і потребують встановлення спеціального програмного забезпечення. Метод металографічного аналізу із використанням перетворення Гафа, який може бути реалізований на оптичних мікроскопах і не потребує спеціального програмного забезпечення, доцільно розглянути як альтернативу методу EBSD. Бібліогр. 24, рис. 5.

Ключові слова: високоміцна низьколегована сталь, зварювання, мікроструктура, металографічний аналіз, межі зерен, розорієнтація структурних зерен, перетворення Гафа

Вступ. Останнім часом в промисловості України суттєво зростає обсяг робіт, пов'язаних з використанням високоміцних низьколегованих сталей (ВМНЛ), виготовлених на провідних металургійних підприємствах ЄС, Великої Британії, США та Канади. Виконання робіт з такими матеріалами ставить нові виклики як для заводських інженерів, так і для науковців. Попередні результати показали, що комплекс механічних властивостей сучасних зарубіжних високоміцних сталей може бути значно вищим порівняно з традиційними сталями вітчизняного виробництва. Обмежувальним фактором сталей з вищою міцністю є їхня підвищена схильність до утворення дефектів внаслідок зварювання. Тому фундаментальним аспектом розробки технології їх зварювання є розуміння того, як властивості металу змінюються під час процесу зварювання, та виявлення основних мікроструктурних характеристик, які пояснюють ці зміни.

Загалом відомо, що механічні властивості металевих матеріалів корелюють з мікроструктурними розмірами, найчастіше із середнім розміром зерна, згідно зі співвідношенням Холла-Петча [1, 2]:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{1/2},$$

де σ_0 – це напруження тертя в ґратці, необхідне для переміщення окремих дислокацій; k – константа, що залежить від матеріалу, відома як

нахил кривої Холла-Петча; d – середній розмір зерна. Співвідношення Холла-Петча застосовується до великого різноманіття матеріалів та їхніх властивостей, таких як твердість, властивості напружено-деформованого стану та границя витривалості [3, 4]. Однак, окрім середнього розміру зерна, для металу зварних швів, для яких характерним є стохастична орієнтація зерен, необхідно враховувати інші специфічні фактори, такі як відмінності в орієнтації пластин фериту в тілі структурних зерен, щоб передбачити властивості матеріалу в загальному випадку.

Відомо, що міцність і в'язкість більшості сталей за низької температури можна покращити шляхом подрібнення зерна під час контрольованого термомеханічного процесу. Численні дослідження показали, що під впливом термічного циклу внаслідок особливостей процесу кристалізації металу може виникати анізотропія структурних і механічних властивостей металу, особливо низькотемпературної в'язкості, що може накладати певні обмеження на вибір технологічних параметрів його обробки [5–7]. Більшість досліджень ВМНЛ стосуються мікроструктурних характеристик і механічних властивостей металу [8, 9], тоді як зв'язок між розміром структурних зерен, їх орієнтацією та в'язкістю руйнування все ще далекий від розуміння через складну ферито-бейніто-мар-

Головка В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>, Штофель О.О. – <https://orcid.org/0000-0003-0965-6340>,

Короленко Д.Ю. – <https://orcid.org/0009-0008-8582-5904>

© В.В. Головка, О.О. Штофель, Д.Ю. Короленко, 2025

тенситну мікроструктуру та через відсутність макроскопічного чисельного показника, який відзеркалює цей зв'язок.

У зв'язку з тим, що ВМНЛ сталі мають підвищену схильність до крихкого руйнування, проєктування технології їх зварювання потребує розробки певних механізмів, які пригнічують утворення та зростання тріщин. Хоча мікроскопічні дефекти, такі як початкові зародки тріщин, завжди присутні в металі зварних швів, особливу увагу необхідно приділяти механізмам, які допомагають запобігати їх утворенню та розгалужуванню, зупиняти розвиток або навіть закривати тріщини, які здатні до зростання або вже почали рости. У фундаментальному огляді [10] показано (рис. 1), що для ВМНЛ сталей саме внутрішні межі розділу є відносно слабкою ланкою щодо утворення та росту тріщин. Це пов'язано з тим, що зростання елементарної тріщини відбувається шляхом розшарування та емісії дислокацій на вершині тріщини, тобто шляхом декогезії атомних зв'язків і здатності матеріалу створювати зону пластичної релаксації навколо вершини тріщини, що поширюється. Через меншу когерентність решітки в зонах меж зерен порівняно з їхньою внутрішньою частиною, тріщини у високоміцних сталях часто можуть легше поширюватися вздовж меж зерен, ніж через їхню внутрішню частину.

Пластичне ковзання на міжзеренних границях визначається конкуренцією між трьома мікросиломи на межі розділу: мікросилою, індукованою об'ємом, пов'язаною з об'ємними щільностями; дисипативною мікросилою, пов'язаною з опором ковзанню на межі розділу, та енергетичною мікросилою, пов'язаною з вектором Бюргера мережі, яка має тенденцію протидіяти накопиченню залишкових дефектів на межі розділу. Більша розори-

єнтація сусідніх зерен затримує нормальне ковзання на межі розділу та знижує швидкість ковзання, збільшуючи швидкість зміцнення. При менших розмірах зерен розвиваються більші градієнти деформації, що призводить до початку ковзання на межі розділу при меншій деформації зсуву.

Поточна точка зору деяких дослідників полягає в тому, що структурні одиниці, які впливають на в'язкість ферито-бейнітних сталей, – це зерна з кутами розорієнтації на межі зерен більше 15° . Це пов'язано з тим, що висококутові межі зерен (ВКМЗ) з кутами розорієнтації меж зерен більше за 15° є ефективними зернами, які сприяють зупинці розвитку тріщини або відхиленню її на великий кут при зустрічі з міжзереною границею у процесі поширення тріщини [11, 12]. Для ОЦК-металів тріщина сколу завжди поширюється вздовж площин сколу $\{100\}$. Кути між сусідніми зернами впливатимуть на здатність змінювати напрямок поширення тріщини, що підтверджується характером фасеток руйнування. Наприклад, автори [13, 14] виявили, що структурні блоки з низькими кутами розорієнтації меж зерен менше за 15° (НКМЗ) є одиницями мікроструктури, які контролюють руйнування сколом і підвищення температури переходу від в'язкості до крихкості.

Прямі дослідження впливу розорієнтації меж зерен на транспорт водню, результати яких наведено в [15], показали, що межі зерен є шляхами з високим потоком дислокацій та зв'язаного з ними водню, де величина потоку зазвичай зростає зі збільшенням енергії зв'язку пасток на межі зерен. Моделювання проникнення водню на ранніх стадіях деформації показало (рис. 2), що висококутові межі зерен є швидшими шляхами, ніж низькокутові.

Слід зазначити, що на сьогодні обсягу експериментальних даних недостатньо для встановлення зв'язку між в'язкістю та структурою в різних напрямках голчастих ферито-бейнітних сталей шляхом аналізу кутів площини сколу $\{100\}$.

Велика кількість експериментів показує, що тріщини можуть проходити як прямо через структурні зерна, так і через межі зерен. Тому ефективне зерно розміром d відповідно до виразу Холла-Петча потребує певних уточнень стосовно ферито-бейнітних структур ВМНЛ сталей. За думкою професора Дерєка Раабе з колегами з Дюсельдорфського інституту Макса Планка [16], умови правильного розуміння та кількісної характеристики різних взаємопов'язаних ефектів міжзерених меж та пов'язаних з ними ефектів у високоміцних сталях можуть відкрити нові шляхи до

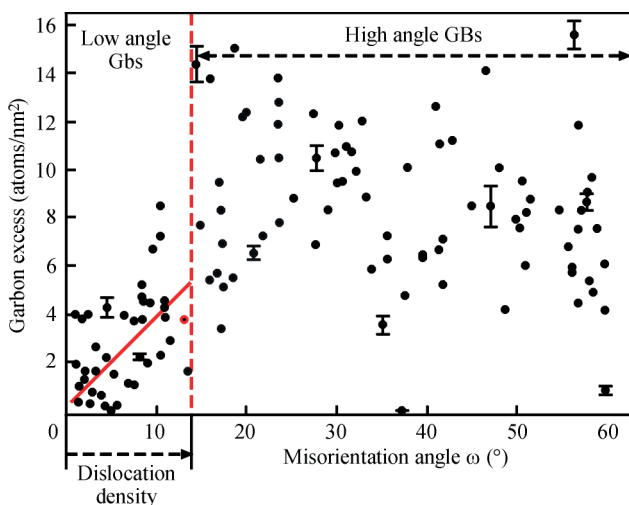


Рис. 1. Удосконалений метод кількісної оцінки вуглецевої сегрегації у фериті [10]

нанорозмірної інженерії стійких до пошкоджень ВМНЛ сталей.

При металографічних дослідженнях для визначення загального кута розорієнтації структурних зерен у якості критерію для характеристики меж зерен використовують метод дифракції зворотного розсіювання електронів (EBSD) – аналітичний метод, інтегрований зі скануючим електронним мікроскопом. EBSD – потужний метод визначення характеристик мікроструктури, який дозволяє отримати важливу інформацію про орієнтацію зерен, ідентифікацію фаз і локальний розподіл деформацій. Метод відіграє дедалі важливішу роль у вдосконаленні нашого розуміння поведінки матеріалів. Сучасні комп’ютерні програми для EBSD аналізу дозволяють обробляти зображення з високою роздільною здатністю, що дає змогу аналізувати дрібномасштабні мікроструктури та отримувати детальні характеристики меж зерен. Крім того, EBSD дозволяє вимірювати градієнти орієнтації, які необхідні для розуміння механізмів деформації.

Метод EBSD широко використовується для характеристики мікроструктури мартенситних і бейнітних сталей, що дає змогу зрозуміти фазові перетворення та граничні характеристики зерен. Ці можливості є вирішальними для оптимізації механічних властивостей сталей, таких як міцність, в’язкість і пластичність [17–20].

У [21] наведено приклад автоматизованої ідентифікації та кількісного статистичного аналізу мікроструктурних границь бейніту з використанням даних EBSD. Результати вказують на те, що кристалографічні відмінності між різними бейнітними та мартенситними структурами забезпечують теоретичну основу для розуміння відмінностей в механічних властивостях металу та дозволяють проводити високопродуктивний статистичний аналіз цих залежностей. Іншим важливим аспектом EBSD є визначення кутів орієнтації зерен у полікристалічному матеріалі, що визначають орієнтацію кристалів відносно відлікової системи координат. Визначення кутів орієнтації дозволяє отримати точніше співвідношення між мікроструктурними характеристиками металу та його механічними властивостями. Виходячи з [21], EBSD можна ефективно використовувати для виділення ознак і кількісного статистичного аналізу мікроструктурної інформації, а методи машинного навчання можуть стати основою для моделювання зв’язку між мікроструктурою та властивостями металу.

Слід зазначити, що метод EBSD може бути реалізовано на електронному мікроскопі та він потребує встановлення спеціальної програми з обробки

діаграм Кікучі. Як альтернатива може розглядатися метод, який базований на перетвореннях Гафа, що дозволяє виявляти кутові орієнтації кристалографічних площин мікроструктури. Програма з обрахунку перетворень Гафа є у відкритому доступі, у аналізу в цьому випадку піддаються зображення металографічних структур, отриманих на оптичних мікроскопах. Такий підхід може бути використано для визначення не тільки загальної картини розподілу кутів орієнтації зерен або кристалів у структурі металу, але й на міжзеренних границях, які є одним з найвірогідніших осередків зародження крихкого руйнування. Саме на цих межах визначається можливість переходу тріщини з одного зерна до іншого або зміна напрямку її руху. За цією методикою комп’ютерна програма [22, 23] виділяє на зображенні мікроструктури кожен пластину фериту, визначає її площу та координати центру площини, проводить через центр максимальну діагональ, будує перпендикуляр до цієї діагоналі й визначає кут його перетину з визначеною віссю (наприклад ось абсцис). Таким чином, кожна пластина фериту на зображенні описується двома параметрами – ρ та θ (ρ – відстань від початку координат до прямої, а θ – кут між прямою, перпендикулярною до заданої, та додатним напрямком осі абсцис). Але такий підхід, з урахуванням щільності розподілу пластин фериту в зернах структурних складових низьколегованих сталей, потребує обробки та аналізу великого обсягу інформації. Сучасні методи комп’ютерного аналізу із залученням ШІ дозволяють вирішити дану проблему.

Спроба використання перетворення Гафа для металографічних досліджень мікроструктури металу зварних швів ВМНЛ сталі була описана в [24]. Автори реалізували візуальний метод аналізу орієнтації і розорієнтації мікроструктурних складових із використанням мови програмування Python. За допомогою ШІ було знайдено положення головного вектора орієнтації кожного структурного зерна (рис. 3) на базі методу, заснованого на аналізі головних компонент (PCA – Principal Component Analysis), що дозволяє визначити основний напрямок орієнтації зерна.

На базі даного аналізу були отримані статистичні дані кутів розорієнтації зерен (рис. 4), що дають змогу проаналізувати досліджувану зону на наявність такого критичного параметра, як відносна щільність розподілу НКГЗ у мікроструктурі металу.

Допустимі межі розорієнтації зерен у металевих структурах залежать від конкретного матеріалу, умов його експлуатації і технології виготовлення.

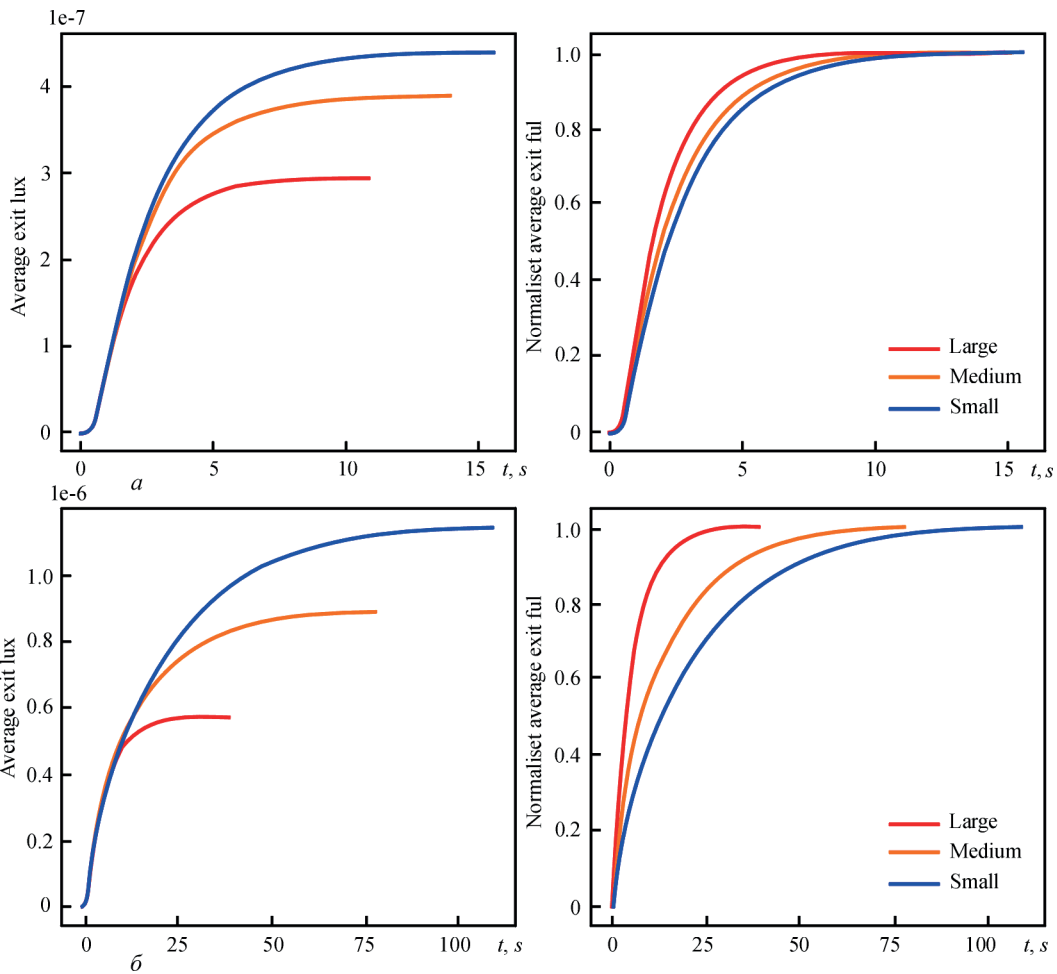


Рис. 2. Криві середнього та нормалізованого вихідного потоку через низькокутові (а) та висококутові (б) межі зерен [15]

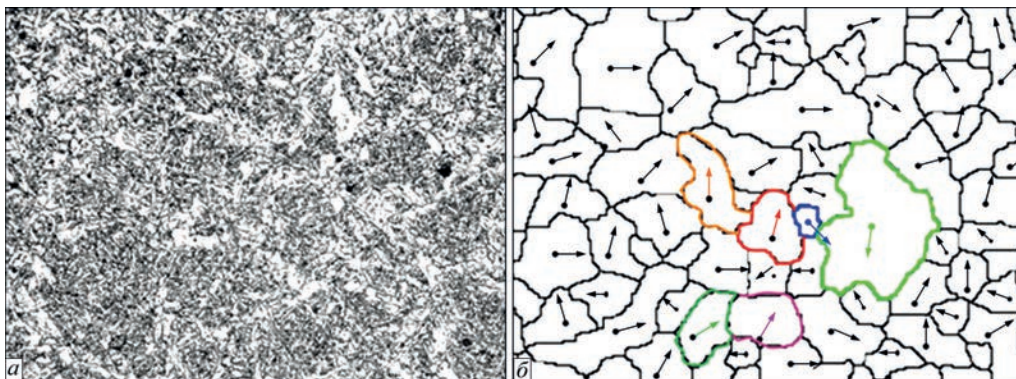


Рис. 3. Мікροструктура основного металу зварного шва сталі 09Г2С (X200) (а). Результати визначення основного напрямку орієнтації структурних зерен та приклади розорієнтації головного вектора двох сусідніх зерен на кут не більше 15° (б)

Як видно з наведених на рис. 4 даних, близько 20 % меж між сусідніми структурними зернами характеризуються кутом розорієнтації не більше за 35°. Такі межі зерен гальмують поширення тріщин вздовж меж зерен і сприяють транскристалітному руйнуванню. На рис. 5 наведено зображення фрактограм зруйнованого при випробуванні на ударний вигін зразка металу зварного шва при температурі -20 °С, які були отримані на електронному мікроскопі Jeol JSM35CF (Jeol, Японія). Як видно з цих зображень, характер розвитку тріщин свідчить саме про такий розвиток процесу руйну-

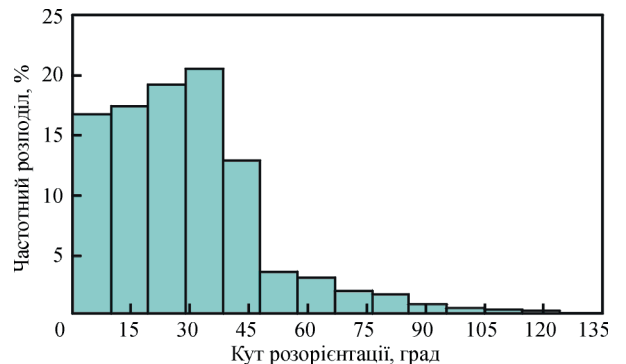


Рис. 4. Розподіл кута розорієнтації на межі двох сусідніх зерен в структурі металу шва

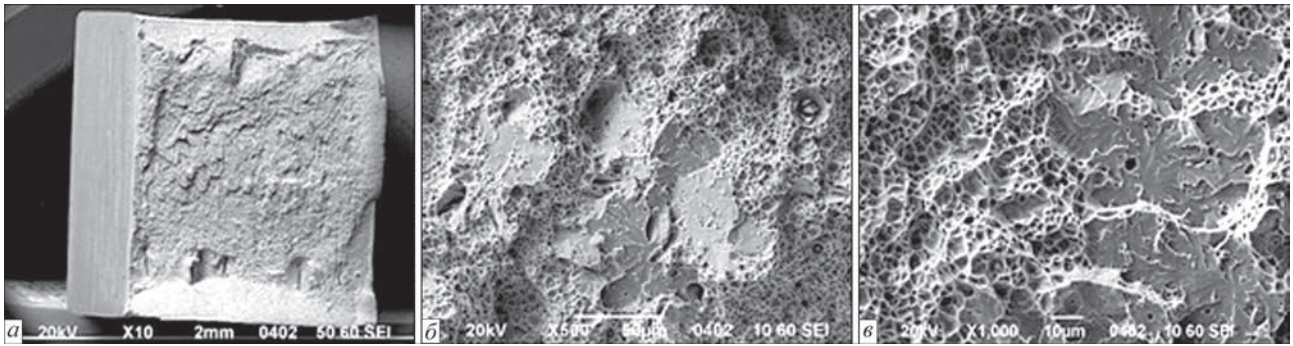


Рис. 5. Фрактографії зламу зразку металу шва сталі 09Г2С після випробування на ударний вигин за температури $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

вання – близько третини тріщин у цьому випадку мають трансзеренний характер.

Незважаючи на збіг визначення кутів розорієнтації на міжзеренних межах мікроструктури з результатами фрактального аналізу, таких даних недостатньо для встановлення критичного рівня щільності НКМЗ у мікроструктурі металу як «критерію крихкості». Такі висновки можливо буде зробити тільки після накопичення суттєвої бази експериментальних даних, їх статистичної обробки та ретельного аналізу. Саме це має бути завданням майбутніх досліджень, результати яких нададуть можливість не тільки розширити нашу базу знань щодо механізмів формування мікроструктури металу, але й підвищити рівень механічних властивостей зварних з'єднань ВМНЛ сталей.

Висновки

Обмежувальним фактором поширення сучасних високоміцних низьколегованих сталей є їхня схильність до утворення дефектів внаслідок зварювання, що виникають у процесі зварювання. Тому фундаментальним аспектом розробки технології їх зварювання є розуміння того, як властивості металу змінюються під час процесу зварювання, та виявлення основних мікроструктурних характеристик, які пояснюють ці зміни.

При визначенні впливу структурних параметрів на властивості металу зварних швів необхідно враховувати такі специфічні фактори, як відмінності в орієнтації виділень фериту в тілі структурних зерен.

Метод металографічного аналізу із використанням перетворення Гафа, який може бути реалізовано на оптичних мікроскопах, не потребує спеціальної програми, з одного боку, і дозволяє визначити орієнтацію пластин фериту в тілі структурних зерен і, відповідно, кута розорієнтації на межі двох контактуючих зерен, з іншого, доцільно розглянути як альтернативу методу EBSD.

Спрощення процедури, за рахунок використання інструментів ШІ, визначення кутів орієнтації структурних зерен і кутів розорієнтації на міжзе-

ренних границях суттєво збільшує базу експериментальних даних для встановлення критичного рівня щільності НКМЗ у мікроструктурі металу як «критерію крихкості».

Отримані результати можуть бути використані при розробці технологічних рішень, коли крім розміру структурних зерен приділяється увага формуванню змішаної мікроструктури зі збалансованим розподілом низькокутових і висококутових меж зерен, що дозволить підвищити як міцність, так і в'язкість металу зварних швів.

Список літератури/References

- Hall, E.O. (1951) The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results. *Proc. Phys. Soc. B*, **64**(9), 747–753. DOI: <http://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303>
- Petch, N.J. (1953) The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel Inst.*, **174**, 25–28.
- Chapetti, M., Miyata, H., Tagawa, T. et al. (2004) Fatigue strength of ultra-fine grained steels. *Mater. Sci. Eng. A*, **381**, 331–336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.04.055>
- Hansen, N. (2004) Hall-Petch relation and boundary strengthening. *Scr. Mater.*, **51**, 801–806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
- Yang, X.L., Xu, Y.B., Tan, X.D., Wu, D. (2014) Influences of crystallography and delamination on anisotropy of Charpy impact toughness in API X100 pipeline steel. *Mater. Sci. Eng. A*, **607**, 53–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.121>
- Joo, M.S., Suh, D.-W., Bae, J.H., Bhadeshia, H.K.D.H. (2012) Toughness anisotropy in X70 and X80 pipeline steels. *Mater. Sci. Eng. A*, **556**, 601–606. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000371>
- Jabr, H.M.A., Speer, J.G., Matlock, D.K. et al. (2013) Anisotropy of mechanical properties of API X70 spiral welded pipe steels. *Mater. Sci. Forum*, **753**, 538–541. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.753.538>
- Sanchez, N., Petrov, R., Bae, J.H., Kim, K. (2010) Texture dependent mechanical anisotropy of X80 pipeline steel. *Adv. Eng. Mater.*, **12**, 973–980. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201000065>
- Cheng, S., Zhang, X., Zhang, J. et al. (2016) Effect of start cooling temperature on microstructure and properties of X80 pipeline steel. *Mater. Sci. Eng. A*, **666**, 156–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.066>
- Herbig, M., Raabe, D., Li, Y.J. et al. (2014) Atomic-scale quantification of grain boundary segregation in nanocrystalline material. *Physical Review Letters*, **112**, 126103. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.126103>
- Duan, Q., Yan, J., Zhu, G.H., Cai, Q.W. (2013) Effects of grain size and misorientation on anisotropy of X80 pipeline steel. *Hot Working Tech.*, **24**, 107–109. https://caod.oriprobe.com/articles/41006381/Effects_of_Grain_Size_and_Misorientation_on_Anisot.htm
- Masoumi, M., Silva, C.C., Abreu, H.F.G.D. (2018) Effect of rolling in the recrystallization temperature region associated

- with a post-heat treatment on the microstructure, crystal orientation, and mechanical properties of API 5L X70 pipeline steel. *J. Mater. Eng. Perfor.*, **27**, 1694–1705. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0651>
13. Deng, C.M., Li, Z.D., Sun, X.J., Yong, Q.L. (2014) Influence mechanism of high angle boundary on propagation of cleavage cracks in low martensite steel. *Mater: Mech. Eng.*, **38**, 20–24.
 14. Shen, J.C., Luo, Z.J., Yang, C.F., Zhang, Y.Q. (2014) «Effective grain size» affecting low temperature toughness in lath structure of HSLA steel. *J. Iron Steel Res. Int.*, **26**(7), 70–76.
 15. Hussein, A., Kim, B., Verbeken, K., Depover, T. (2024) The effect of grain boundary misorientation on hydrogen flux using a phase-field based diffusion and trapping model. *Advanced Engineering Materials*, **26**(22), 2401561. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202401561>
 16. Raabe, D., Herbig, M., Sandlöbes, S. et al. (2014) Grain boundary segregation engineering in metallic alloys: A pathway to the design of interfaces. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **18**, 253–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2014.06.002>
 17. Stojanovic, N., Glisovic, J., Abdullah, O.I. et al. (2022) Particle formation due to brake wear, influence on the people health and measures for their reduction: a review. *Environ Sci. Pollut Res.*, **29**, 9606–9625. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17907-3>
 18. Vincentis, N.S., Roatta, A., Bolmaro, R.E., Signorelli, J.W. (2019) EBSD analysis of orientation gradients developed near grain boundaries. *Materials Research*, **22**(1), e20180412. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0412>
 19. Pauli, L., Heikki, R. (2022) EBSD characterisation of grain size distribution and grain sub-structures for ferritic steel weld metals. *Welding in the World*, **66**, 363–377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01225-w>
 20. Hwang, B., Kim, Y.G., Lee, S. et al. (2005) Effective grain size and Charpy impact properties of high-toughness X70 pipeline steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **36**, 2107–2114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0331-9>
 21. Stojanovic, N., Belhocine, A., Abdullah, O.I., Grujic, I. (2023) The influence of the brake pad construction on noise formation, people's health and reduction measures. *Environ Sci. Pollut Res.*, **30**, 15352–15363. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23291-3>
 22. Li, X.C., Zhao, J.X., Cong, J.H. et al. (2021) Machine learning guided automatic recognition of crystal boundaries in bainitic/martensitic alloy and relationship between boundary types and ductile-to-brittle transition behavior. *J. Mater. Sci. Technol.*, **84**, 49–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.12.024>
 23. Atiquzzaman, M. (1992) Multiresolution Hough transform—an efficient method of detecting patterns in images. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14**(11), 1090–1095. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.166623>
 24. Журавель І.М., Максимович В.М. (2018) Кількісний аналіз орієнтації та видовженості зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа. Науковий вісник НЛТУ України, **28**(5), 135–139. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280528>
- Zhuravel, I.M., Maksymovych, V.M. (2018) Quantitative analysis of orientation and elongation of grains on metallographic images using Hough transformations. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, **28**(5), 135–139 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280528>

USE OF THE HOUGH TRANSFORMATION METHOD FOR THE METALLOGRAPHIC STUDIES OF FERRITIC-BAINITIC STEELS MICROSTRUCTURE

V.V. Holovko¹, O.O. Shtofel^{1,2}, D.Yu. Korolenko¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: v_golovko@ukr.net

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: o.shtof@gmail.com

High-strength low-alloy steels are a promising material for the manufacture of welded metal structures, but their widespread use is hampered by their increased sensitivity to defects that arise during the welding process. Therefore, a fundamental aspect of developing the technology for welding these steels is understanding how the properties of the metal change during the welding process and identifying the main microstructural characteristics that explain these changes. Research on high-strength ferritic-bainitic steels, which concerns the microstructural characteristics and mechanical properties, is aimed at determining the total angle of structural grains disorientation, using the electron backscatter diffraction (EBSD) method, which can be implemented on electron microscopes, and requires special software installation. The metallographic analysis method using the Hough transformation, which can be implemented on optical microscopes and does not require special software, should be considered as an alternative to the EBSD method. 24 Ref., 5 Fig.

Keywords: high-strength low-alloy steel, welding, microstructure, metallographic analysis, grain boundaries, structural grains disorientation, Hough transformation

Отримано 21.02.2025

Отримано у переглянутому вигляді 16.07.2025

Прийнято 12.09.2025

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua; patonpublishinghouse@gmail.com

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

ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГДНІ

Передплата доступна

у друкованому

та цифровому форматах!



АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК В УКРАЇНІ

І.В. Зяхор¹, Є.В. Антіпін¹, О.В. Дідковський¹, А.М. Левчук¹, В.В. Калюжний², В.В. Озюменко²,
О.А. Великоіваненко¹, П.М. Руденко¹, Ю.А. Шило¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: zyakhor2@ukr.net

²Філія «Центр з будівництва та ремонту колії» АТ «Укрзалізниця». 01103, м. Київ, Залізничне шосе, 5Б

З'єднання рейок у стаціонарних і польових умовах переважно виконується контактним стиковим зварюванням оплавленням (КСЗО), яке впродовж багатьох років успішно використовується на залізницях України та за кордоном. У статті проаналізовано критичні проблеми щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану в Україні. Для вирішення цих проблем Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України спільно з Філією «Центр з будівництва та ремонту колії» АТ «Укрзалізниця» розробили комплекс заходів щодо забезпечення якісного зварювання рейок у стаціонарних і польових умовах при ремонті та спорудженні безстикових залізничних колій відповідно до вимог чинних нормативних документів. Наведено результати робіт (науково-дослідних, технологічних, науково-технічних експертиз) з реалізації цих заходів за період 2022–2025 рр. Зокрема успішно проведено аудит технічного стану рейкозварювальних машин, удосконалено технологію та відпрацьовано технологічні режими КСЗО залізничних рейок, удосконалено систему забезпечення якості з'єднань при КСЗО залізничних рейок, підготовлено нові редакції нормативних документів на КСЗО залізничних рейок, проводяться роботи з удосконалення конструкції машин для КСЗО, розвивається співробітництво з компаніями для відновлення виробництва рейкозварювального устаткування в Україні. Бібліогр. 43, табл. 4, рис. 17.

Ключові слова: залізнична рейка, зварне з'єднання, контактне стикове зварювання оплавленням, залізнична хрестовина

Вступ. Безстикова колія є найпрогресивнішою конструкцією верхньої будови колії в умовах сучасної експлуатації залізниць [1]. З'єднання рейок у стаціонарних і польових умовах переважно виконується контактним стиковим зварюванням оплавленням (КСЗО), яке впродовж багатьох років успішно використовується на залізницях України і за кордоном [2]. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ) з 1950-х років є світовим лідером у галузі розробки технологій та устаткування для КСЗО залізничних рейок [3–5].

В ІЕЗ під загальним керівництвом академіка Б.Є. Патона та безпосереднім керівництвом академіків НАН України В.К. Лебедева та С.І. Кучука-Яценка вперше в світі створено високоефективне мобільне устаткування для КСЗО залізничних рейок у польових умовах. В його основу покладено оригінальну конструкцію вторинного контуру зварювальних трансформаторів зі зниженим опором короткого замикання та технологію контактного стикового зварювання безперервним оплавленням з програмною зміною основних параметрів процесу КСЗО. Створено унікальне зварювальне устаткування [3–5], яке, у порівнянні з кращими закордонними аналогами, відрізнялось

суттєво меншими габаритами, вагою, споживаною потужністю, високим коефіцієнтом корисної дії, повною автоматизацією процесу зварювання, що забезпечило можливість виконання зварювання рейок на місці укладання колії.

Перші мобільні рейкозварювальні машини були виготовлені в ІЕЗ, а з 1961 р. на Каховському заводі електрозварювального устаткування було впроваджено у серійне виробництво мобільні (К155, К255, К255Л, К355) та стаціонарні (К190, К190М, К190ПА) рейкозварювальні машини, які успішно працювали в Україні та в десятках країн на всіх континентах [4]. Устаткування й ліцензії на технологічні розробки ІЕЗ придбали ряд провідних закордонних компаній, зокрема Plasser & Theurer (Австрія), Holland і Progress Rail Services (США), Network Rail (Великобританія). Подорожуючи залізничним транспортом територіями України, США, Китаю, Європейського Союзу та багатьох країн світу, більшість пасажирів не уявляють, що зварні стики рейок виконано за допомогою технологій та устаткування, створеного в ІЕЗ. До того ж, це стосується й колій метрополітену в м. Києві, Вашингтоні, Нью-Йорку, Сінгапурі, Шанхаї, Пекіні, Бангкоці та інших містах. Рейкозварювальні підприємства АТ «Укрза-

Зяхор І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7780-0688>, Антіпін Є.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3297-5382>,
Дідковський О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5268-5599>, Левчук А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-0361-7394>,
Великоіваненко О.А. – <https://orcid.org/0009-0007-3704-2000>, Руденко П.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7770-2145>,
Шило Ю.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6174-5925>,
© І.В. Зяхор, Є.В. Антіпін, О.В. Дідковський, А.М. Левчук, В.В. Калюжний, В.В. Озюменко, О.А. Великоіваненко
П.М. Руденко, Ю.А. Шило, 2025

лізниця» використовують виключно технології та устаткування для КСЗО, розроблені ІЕЗ.

У 2000-х роках на основі результатів фундаментальних досліджень в ІЕЗ розроблено та впроваджено технологію КСЗО рейок з пульсуючим режимом нагрівання (пульсуючим оплавленням), спроектовано та освоєно виробництво нового покоління мобільних (К900, К920, К921, К922, К930, К945, К950, К960, К963, К1045) і стаціонарних (К1000, К924) рейкозварювальних машин. У них уперше в світі втілено низку захищених міжнародними патентами інноваційних технічних рішень в області технології зварювання, конструкції зварювальних машин, принципів центрування рейок, систем керування процесом КСЗО і контролю якості зварних стиків [6–10].

Широкомасштабне військове вторгнення в Україну у 2022 р. призвело до виникнення ряду критичних проблем щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану. Серед них – зупинка внаслідок окупації виробництва вітчизняних рейок комбінатом «Азовсталь», що актуалізувало проблему зварювання старопридатних [11] і нових [12–17] рейок різних марок та заводів-виробників, з різними технологіями термозміцнення, зокрема у різнорідному поєднанні; припинення Каховським заводом електрозварювального устаткування («КЗЕСО») виробництва вітчизняного рейкозварювального устаткування, що призвело до зриву постачання Дніпровському стрілочному заводу стаціонарної машини К924 для КСЗО залізничних хрестовин і АТ «Укрзалізниця» новітніх рейкозварювальних комплексів КЗМ007, обладнаних машинами К922-1, та обумовило необхідність термінового вирішення проблеми подовження експлуатаційного ресурсу наявного зварювального устаткування.

Для вирішення цих проблем ІЕЗ спільно з Філією «Центр з будівництва та ремонту колії» («ЦБРК») АТ «Укрзалізниця» розробили комплекс заходів щодо забезпечення якісного зварювання рейок у стаціонарних і польових умовах при ремонті та спорудженні безстикових залізничних колій відповідно до вимог чинних нормативних документів [11–13]. Зазначений комплекс заходів включає організаційні, науково-дослідні, конструкторські та технологічні роботи, проведення науково-технічних експертиз.

Найактуальнішими та першочерговими для вирішення визначено такі завдання:

- встановлення причин невідповідності окремих зварних стиків залізничних рейок різних марок, різних заводів-виробників вимогам нормативних документів;
- аудит технічного стану наявного в АТ «Укрзалізниця» рейкозварювального устаткування та

розробка заходів для подовження його експлуатаційного ресурсу;

- удосконалення технології та відпрацювання технологічних режимів КСЗО залізничних рейок конверторного виробництва;

- удосконалення системи забезпечення якості з'єднань при КСЗО залізничних рейок;

- підготовка рекомендацій та внесення змін до чинних нормативних документів, розробка нової редакції технічних умов на КСЗО залізничних рейок;

- удосконалення конструкції мобільних рейкозварювальних машин;

- пошук компаній, які мають виробничі потужності для відновлення виробництва устаткування для КСЗО.

Мета роботи – надати стисло інформацію щодо результатів робіт за період 2022–2025 рр. для реалізації розробленого комплексу заходів для забезпечення якісного зварювання залізничних рейок в умовах воєнного стану в Україні.

Встановлення причин невідповідності окремих зварних стиків залізничних рейок вимогам нормативних документів. За заявками ЦБРК АТ «Укрзалізниця» фахівці ІЕЗ виконували науково-технічні експертизи причин невідповідності вимогам нормативних документів зварних стиків залізничних рейок різних марок, різних заводів-виробників, зокрема при їх механічних випробуваннях згідно з вимогами чинних стандартів [11–13]. На основі результатів операційного контролю, аналізу протоколів зварювання, макроаналізу та металографічних досліджень з'єднань рейок, фрактографічних досліджень зламів зварних стиків визначали причини їх руйнування при механічних випробуваннях на статичний згин і при циклічних навантаженнях у процесі експлуатації залізничної колії. Використовували методи макроаналізу, мікроаналізу, вимірювання твердості (NOVOTEST TC-GPB) і мікротвердості (М400, Leco), оптичної мікроскопії (Neophot-32), растрової електронної мікроскопії (РЕМ), мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА), Оже-електронної спектроскопії (Оже-мікрозонд JAMP-9500F JEOL із встановленим EDS-спектрометром OXFORD EDS INCA Energy 350) [18].

В якості ілюстрації змісту проведеного комплексу робіт з цього напрямку нижче наведено фрагмент звіту науково-технічної експертизи причин невідповідності вимогам нормативних документів (руйнування при випробуваннях на статичний згин) зварного стика рейок типу Р65 марки Е76Ф, виконаного КСЗО безперервним оплавленням рейкозварювальною машиною К355. Предмет дослідження – виявлені на злам (рис. 1) зварного стика дефекти в підшві рейки за кодом 66.3 і дефекти в шийці за кодом 56.3 [19].

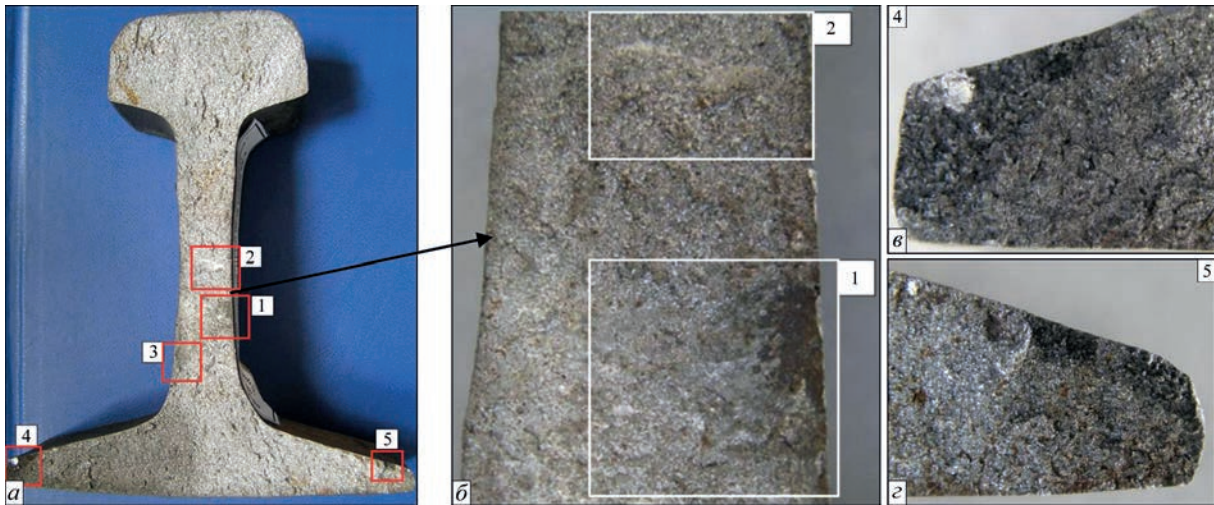


Рис. 1. Злам зварної рейки (а), дефекти в шийці (б) та підшві (в, з) рейки

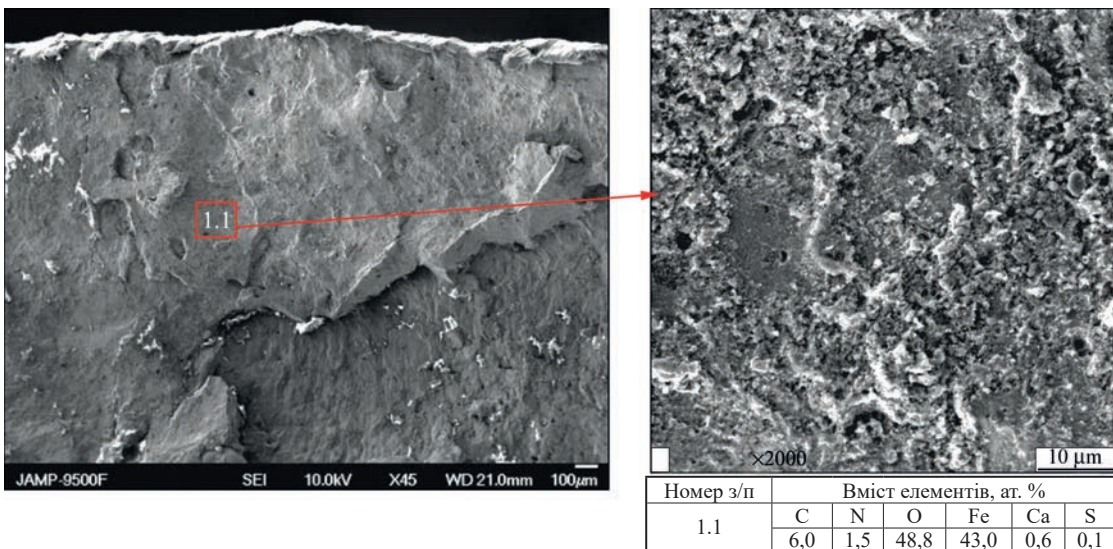


Рис. 2. РЕМ-зображення ділянок № 1 (див. рис. 1, а) зламу і №1.1 після іонного травлення іонами Ag⁺ з енергією 3 кеВ на глибину 60 нм, результати Оже-спектрометрії ділянки № 1.1

Злам зварного стику рейок за макрогеометрією поверхні руйнування є неоднорідним [20], оскільки має геометричні зони з різним макрорельєфом поверхні руйнування. За станом поверхні та мікрорельєфом руйнування злам у головці та переважній частині шийки й підшви є кристалічним, квазікристалічним, міжзерняним [21, 22].

У шийці рейки на ділянках зламу №№ 1, 3 (рис. 1, а) спостерігаються дефекти у вигляді темних плям без металевих блисків та ознак кристалічного зламу (рис. 2). Загальна площа цих дефектів складає близько 60 мм², що свідчить про невідповідність зварного стику рейок вимогам нормативної документації [11–13].

Хімічний склад темних ділянок приблизно відповідає складу оксиду заліза FeO (рис. 2, б). Згідно з [21] цей вид дефекту можна віднести до групи 4 «Незплавлення» підгрупи Р401 «Відсутність зварювання» або Р403 «Недостатнє сплавлення/злипання зварного шва». Найімовірнішою причиною утворення таких дефектів є порушення процесу

оплавлення перед осадкою на стадії форсування (інтенсивного оплавлення).

На ділянці № 2 зламу в шийці рейки виявлено дефект розмірами 0,3...2×10 мм (рис. 3, а) у вигляді світлої плями з металевим блиском без ознак кристалічного зламу. Дефект витягнутий у поперечному напрямку шийки, загальна площа – близько 18 мм², що перевищує допустиме максимальне значення згідно з [11–13]. Поверхня зламу на ділянках №№ 2 і 3 не має ознак кристалічного зламу, має вигляд локально оплавленої поверхні з незначним металевим блиском, основною складовою є залізо (близько 85 %) з незначним вмістом кисню (близько 6 %). Численні вкраплення, розташовані на поверхні дефекту, за хімічним складом відповідають залізомарганцевим силікатам, які присутні в основному металі рейкової сталі, що свідчить про їх металургійне походження [23].

При металографічних дослідженнях прилеглих до зламу зварного стику ділянок зони термічного впливу (ЗТВ) встановлено, що загальна ширина

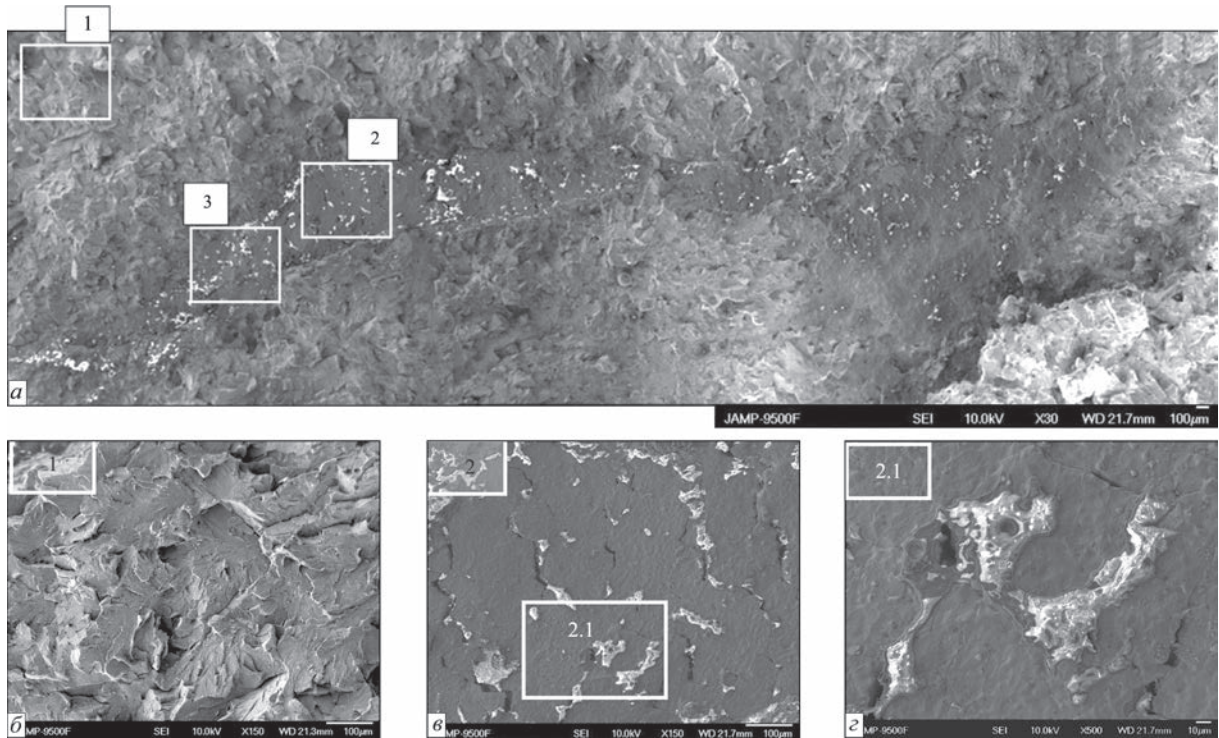


Рис. 3. РЕМ-зображення поверхні зламу на ділянці № 2 (див. рис. 1) (а) і локаціях 1, 2 і 2.1 (б, в)

ЗТВ значно перевищує вимоги [17], який регламентує допустиме значення ширини ЗТВ у межах 20...45 мм. Суттєве збільшення ширини ЗТВ у порівнянні з вимогами [17] могло бути наслідком декількох факторів, а саме: перегрівом рейок (надмірне енерговкладення у зварний стик), тривалим коротким замиканням торців рейок при оплавленні, надмірно тривалим процесом оплавлення.

На ділянках зламу в підшві рейки виявлено дефекти за кодом 66.3 [19] (див. рис. 1, в, ділянки 4, 5). За результатами фрактографічних досліджень зламів встановлено, що вони є дефектами групи 3 «Тверді включення», Р306 «Включення литого металу (залишки розплавленого металу з домішками у зварному шві)» [21].

Імовірними причинами утворення цих дефектів і невідповідності зварного стику нормативним вимогам [11–13, 17] є поєднання декількох чинників, зокрема: надмірне енерговкладення у зварний стик, локальне окислення торців рейок на стадії інтенсивного оплавлення, попадання перегрітого металу в площину з'єднання при зрізанні ґрата. Встановлено, що зоною стартового розвитку тріщини та причиною зламу зварного стику є дефекти в підшві рейки; руйнування стику обумовлено розташуванням дефектів у зоні напружень розтягу.

Дефекти у підшві рейки (групи 3, Р306) відносно складно виявити наявними ультразвуковими дефектоскопами після зварювання стику, оскільки вони мають монолітну структуру перегрітого металу, окисленого по границям зерен, без наявності порожнин. При ультразвуковому контролі наявни-

ми дефектоскопами такі дефекти можуть сприйматись як структурні шуми.

Основні результати науково-технічних експертиз причин невідповідності зварних стиків залізничних рейок вимогам нормативних документів наведено у висновках, які містять класифікацію зламу зварного стику рейок за макрогеометрією поверхні руйнування, характеристику зламу за станом поверхні та мікромеханізмом руйнування, класифікацію дефектів, висновки про відповідність зварного стику нормативним вимогам, обґрунтування ймовірних причин утворення дефектів і причин зламу зварного стику рейок, оцінку можливості виявлення наявних дефектів методами ультразвукової дефектоскопії.

За результатами науково-технічних експертиз зварних стиків залізничних рейок типу Р65 різних марок (Е76Ф, К76, К76Ф, Р350НТ) та різних заводів-виробників, виконаних мобільними рейкозварювальними машинами К355, К900, К922-1 протягом 2024–2025 рр., фахівці ІЕЗ розробили рекомендації щодо недопущення виникнення дефектів у зварних стиках рейок і надійного виявлення можливих дефектів при неруйнівному контролі стиків, а також перелік практичних заходів для їх реалізації. Основними заходами недопущення дефектних зварних стиків у залізничній колії є: вдосконалення технології та відпрацювання технологічних режимів КСЗО рейок різних марок; неухильне дотримання персоналом вимог [11–13] до виконання допоміжних і зварювальних робіт; використання зварювальних машин, обладнаних системами реєстрації основних параметрів процесу

КСЗО; вчасне проведення моніторингу технології зварювання рейок за електронними рапортами, які надходять з рейкозварювальних підприємств АТ «Укрзалізниця». Також рекомендовано використання технології фазованих антенних решіток для ультразвукового контролю зварних стиків рейок.

Аудит технічного стану рейкозварювального устаткування. Протягом звітнього періоду фахівці ІЕЗ провели на всіх рейкозварювальних підприємствах (РЗП) АТ «Укрзалізниця» аудит технічного стану зварювальних машин, зокрема стаціонарних К1000 та мобільних К355А, К900, К920, К922-1. У результаті виконаних робіт виявлено наявні проблеми, наведені в актах технічного стану устаткування; спільно з Філією «ЦБРК» АТ «Укрзалізниця» розроблено комплекс заходів для підтримки заданих технічних характеристик і продовження експлуатаційного ресурсу рейкозварювальних машин у складі комплексів КЗМ 005, КЗМ 007, КРЗМ 3, КРЗМ 4, КРЗ 1 (рис. 4), укладено нові договори на виконання аналогічних робіт. Плідна співпраця у цьому напрямку продовжується.

Удосконалення технології та відпрацювання технологічних режимів КСЗО залізничних рейок конверторного виробництва. Після зупинки у 2022 р. внаслідок окупації м. Маріуполь виробництва вітчизняних рейок комбінатом «Азовсталь» на залізницях України почали використовувати рейки Р65 (60Е1) конверторного виробництва різних марок з різними технологіями термозміцнення, які закуповуються у різних заводів-виробників та отримані в якості гуманітарної допомоги. Рейкозварювальні підприємства АТ «Укрзалізниця» спільно з ІЕЗ у стислі терміни повинні були вирішити проблему вдосконалення технології та відпрацювання технологічних режимів КСЗО рейок різних марок (R350HT, R350LHT, R400HT), зокрема, у різномірному сполученні. Аналогічна проблема виникла при використанні старопридатних рейок мартенівського та конверторного виробництва марок М76, Е76, Е76Ф, К76, К76Ф, які при укладанні в залізничну колію необхідно зварювати між собою та у різномірному поєднанні.

У попередні роки технологічні режими КСЗО рейок визначались експериментально для наявного типу рейок і конкретної рейкозварювальної машини. Вимогами чинних нормативних документів [11–13] регламентуються допустимі діапазони зміни окремих параметрів КСЗО рейок, зокрема: напруги первинної обмотки зварювальних трансформаторів і величини переміщення на різних етапах процесу КСЗО; тиску осадки; швидкості переміщення при оплавленні, форсуванні та осадці; час осадки під струмом тощо. На основі аналізу результатів багаторічного практичного досвіду з

КСЗО рейок на рейкозварювальних підприємствах АТ «Укрзалізниця», механічних випробувань і металографічних досліджень зварних стиків було встановлено, що забезпечення у визначених межах технологічних параметрів КСЗО є необхідною, але недостатньою умовою одержання зварних з'єднань рейок, які задовольняють вимогам [11–13].

Більш того, гарантування відповідності зварних стиків рейок вимогам національного стандарту [17], гармонізованого з відповідним європейським нормативним документом, передбачає забезпечення певних параметрів ЗТВ, а саме: допустимого діапазону значень ширини ЗТВ (мінімальне $H_{ЗТВ\ min}$ та максимальне $H_{ЗТВ\ max}$ значення) та її нерівномірності по довжині та перерізу рейок, і додатково містить вимоги до мікроструктури металу в ЗТВ – унеможливується утворення гартівних структур.

Розробка та затвердження режиму КСЗО рейок кожної марки на конкретній рейкозварювальній машині вимагало проведення комплексу робіт, які включали: механічні випробування, металографічні та фрактографічні дослідження, неруйнівний контроль, визначення розподілу твердості тощо. Дотепер не був визначений надійний алгоритм забезпечення якості зварних з'єднань рейок при зміні зовнішніх факторів (стан зварювальної машини, параметри дизель-генератора, якість підготовки кінців рейок тощо). Розробка зазначеного алгоритму якості з'єднань рейок базувалася на ідеї академіка НАН України С.І. Кучука-Яценка про використання величини загального енерговкладення $Q_{опл}$ у процесі оплавлення рейок в якості комплексного параметра, який враховує вплив інших енергетичних параметрів процесу КСЗО на розподіл температури в ЗТВ, формування мікроструктури та механічні властивості зварних з'єднань рейок. Реалізація цієї ідеї полягала у визначенні та науковому обґрунтуванні діапазону зміни величини $Q_{опл}$ при КСЗО сучасних рейок конверторного виробництва, у якому забезпечується відповідність зварних стиків вимогам чинних стандартів. З практичної точки зору це дозволить суттєво скоротити час та об'єм досліджень і випробувань при розробці та відпрацюванні технологічних режимів КСЗО рейок різних марок незалежно від параметрів електричної мережі, стану рейкозварювальної машини тощо. Нижче наведено короткий опис проведених досліджень і отриманих результатів.

Розрахунками зміни теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) процесів нагрівання рейок при безперервному (БО) і пульсуючому оплавленні (ПО) встановлено, що при БО рейок значення ККД зменшується з 0,7 (у початковий період) до 0,45 при $t_{опл} = 180$ с, а при ПО – ККД зменшується з 0,9 у початковий період оплавлення до 0,7 при $t_{опл} = 80$ с (рис. 5). Проведеними розрахунками об-



Рис. 4. Мобільні машини K922-1 у складі рейкозварювальних комплексів КЗМ 005 (а), КЗМ 007 (б), КРЗ 1 (в)

грунтовано використання ПО у якості базового процесу при розробленні ефективної технології КСЗО сучасних залізничних рейок конверторного виробництва.

Проводили розрахункове дослідження нагрівання рейок типу Р65 (60Е1) при ПО з програмною зміною напруги U (рис. 6) на різних стадіях процесу оплавлення.

Спільно з відділом № 34 ІЕЗ розроблено математичні моделі та відповідні засоби комп'ютерного моделювання кінетики температурних полів при КСЗО залізничних рейок. Використано чисельне розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності поряд із комплексом необхідних лабораторних вимірювань впливу технологічних параметрів КСЗО на температурні цикли в рейках, що зварюються. Це дозволило врахувати мультифізичні процеси оплавлення торців рейок, визначити характерну теплову ефективність процесу КСЗО.

За допомогою математичної моделі розраховувались термічні цикли та розподіл температур в ЗТВ при ПО рейок типу Р65 марки К76Ф. При проведенні розрахунків значення основних параметрів режимів КСЗО (табл. 1) встановлювали в межах, передбачених [13].

Для оцінки достовірності математичної моделі проводили експериментальні дослідження термічних циклів і визначали розподіл температур у зварних з'єднаннях, отриманих КСЗО згідно з табл. 1. Експерименти з дослідження термічних циклів при КСЗО виконували на стаціонарних та мобільних машинах К1000 і К922-1 (рис. 7). Використовували систему термопар, закріплених у го-

ловці рейки на різній відстані від торця рейки з кроком 5 мм. Перша термопара розміщувалась на відстані 18 мм від торця рейки, що передбачало її розташування після закінчення процесу КСЗО на відстані 5 мм від лінії з'єднання.

Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних дослідження термічних ци-

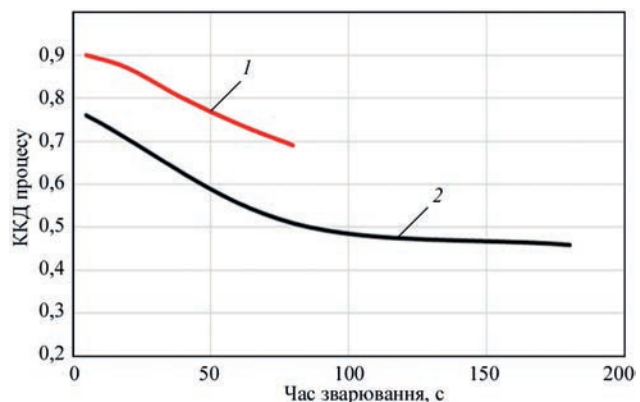


Рис. 5. Зміна ККД у часі при КСЗО: 1 – ПО; 2 – БО (розрахункові дані)

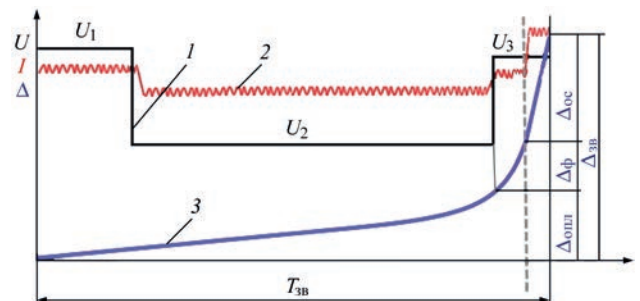


Рис. 6. Циклограма процесу КСЗО з програмною зміною первинної напруги: 1 – напруга; 2 – струм; 3 – переміщення

Таблиця 1. Режим КСЗО рейок К76Ф

Параметр	Значення
Первинна напруга на різних стадіях оплавлення U , В	$U_1 = 400, U_2 = 300, U_3 = 400$
Середнє значення первинного струму I на різних стадіях оплавлення, А	$I_1 = 420, I_2 = 380, I_3 = 420$
Тривалість оплавлення загальна $t_{опл}$ ($t_{1,2,3}$ – по стадіях), с	$t_{опл} = 80$ ($t_1 = 30, t_2 = 45, t_3 = 5$)
Час осадки під струмом, с	1
Припуск на оплавлення $\Delta_{опл}$ загальний ($\Delta_{1,2,3}$ – по стадіях), мм	14 ($\Delta_1 = 3, \Delta_2 = 7, \Delta_3 = 4$)
Величина осадки $\Delta_{ос}$, мм	12
Розрахункова величина енерговкладення $Q_{опл}$, МДж	12,8

клів при оплавленні (рис. 8) показує, що математична модель має похибку розрахунку близько 8 %, що дає можливість із задовільною точністю прогнозувати кінетику температурного поля в рейках при КСЗО. Це дозволяє використовувати математичну модель для дослідження впливу основних параметрів КСЗО на процеси нагрівання й охолодження зварних стиків рейок. Встановлено, що максимальне значення швидкості охолодження у зварному з’єднанні та ЗТВ досягається по лінії з’єднання, де температура нагрівання у процесі КСЗО була максимальною.

Із використанням розробленої математичної моделі досліджували вплив на ефективність процесу нагрівання та розподіл температури в зоні зварного з’єднання рейок типу Р65 (60Е1) параметрів процесу КСЗО, а саме: первинної напруги U джерела живлення на різних стадіях процесу оплавлення ($U_1 - U_3$), припуску $\Delta_{ф}$ стадії інтенсивного оплавлення (форсування), тривалості оплавлення $t_{опл}$, і величини енерговкладення $Q_{опл}$. Розподіл температур по осі зварного з’єднання рейок при КСЗО з різною величиною напруги U на другій стадії процесу наведено на рис. 9.

На основі отриманих результатів обґрунтовано використання процесу КСЗО з програмною зміною в часі напруги джерела живлення, уточнено циклограму процесу оплавлення, яка передбачає поетапну зміну значення U в діапазоні $U_1 = 355...440$ В на першій стадії оплавлення, у діапазоні $U_2 = 250...300$ В на другій (квазістаціо-

нарного нагрівання) і в межах $U_3 = 355...440$ В на третій (інтенсивного оплавлення – форсування).

Визначали розподіл температури по осі зварного з’єднання рейок при КСЗО з різною величиною тривалості процесу оплавлення $t_{опл}$. Результати розрахунків для значень $t_{опл} = 90$ і 120 с наведено на рис. 10. Критеріями вибору мінімально допустимого значення $t_{опл}$ було досягнення розподілу температури по осі оплавлених рейок, при якому забезпечуються умови для виконання осадки на задану величину припуску на осадку $\Delta_{ос} = 12$ мм (ширина ЗТВ з температурою нагрівання до 1000 °С повинна перевищувати $\Delta_{ос} = 12$ мм). Як видно з отриманих даних, для $t_{опл} = 90$ с і більше забезпечується виконання вищенаведеної умови.

Розрахунковим шляхом визначали залежність мінімального $H_{ЗТВ\ min}$ та максимального $H_{ЗТВ\ max}$ значень ширини ЗТВ зварного з’єднання (згідно з вимогами [17]) від тривалості процесу оплавлення $t_{опл}$ у діапазоні 50...140 с. Встановлено, що при ПО залізничних рейок типу Р65 (60Е1) при збільшенні $t_{опл}$ у зазначеному діапазоні значення енерговкладення $Q_{опл}$ змінюється в діапазоні $Q_{опл} = 9...18$ МДж, при цьому значення $H_{ЗТВ\ min}$ зростає від 16 до 22 мм, а значення $H_{ЗТВ\ max}$ – від 36 до 54 мм.

Важливим параметром термічного циклу при КСЗО рейок є швидкість охолодження $W_{8/5}$ металу зварного з’єднання в інтервалі температур $800...500$ °С. Цей параметр визначає наявність або відсутність гартівних структур, дисперсність перліту, показники міцності та твердості в ЗТВ

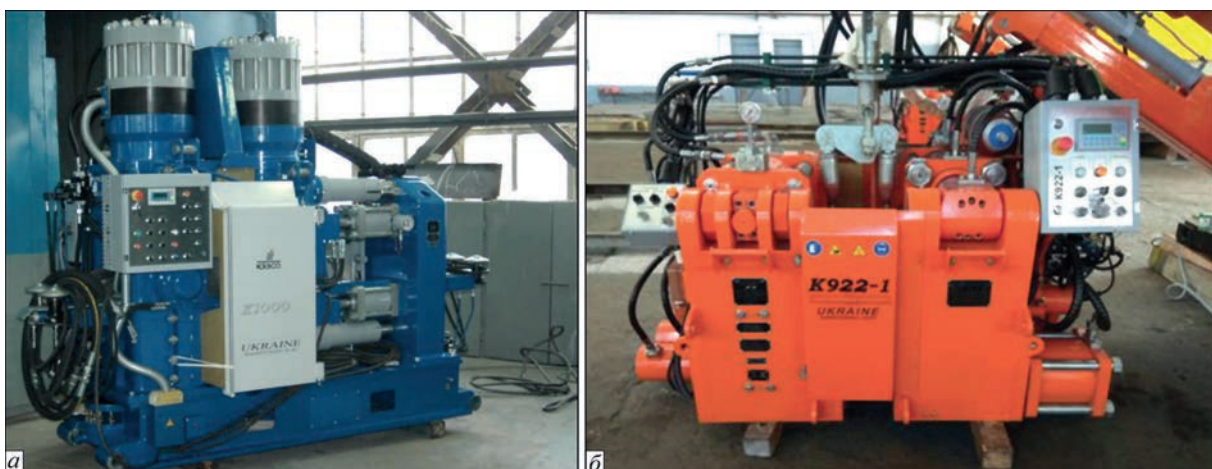


Рис. 7. Рейкозварювальні машини К1000 (а), К922-1 (б)

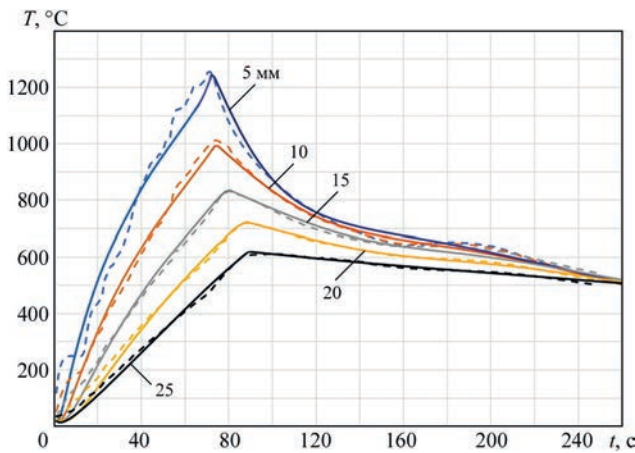


Рис. 8. Розрахункові (пунктирні лінії) та експериментальні (суцільні лінії) термічні цикли при КСЗО рейок Р65 (60E1)

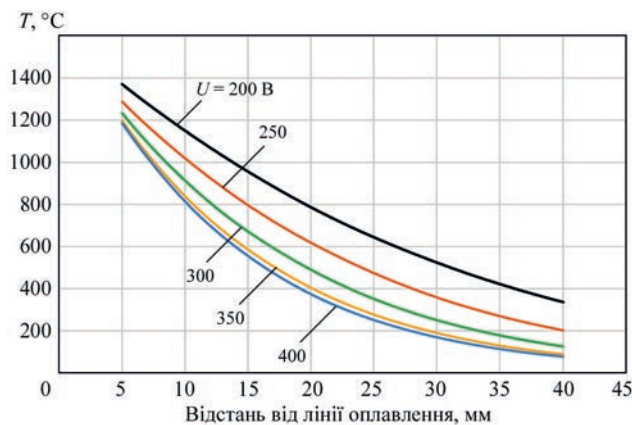


Рис. 9. Розподіл температур по осі зварного з'єднання рейок при КСЗО з різною величиною напруги U , В на другій стадії процесу оплавлення (див. рис. 6)

марки К76Ф на різній відстані від лінії з'єднання

зварного з'єднання. Розрахунковим шляхом досліджували залежність швидкості охолодження $W_{8/5}$ зварних з'єднань після КСЗО залізничних рейок типу Р65 марки К76Ф від величини $Q_{опл}$. При розрахунках швидкості охолодження $W_{8/5}$ металу в ЗТВ з'єднань значення $Q_{опл}$ змінювали у вищенаведених межах, а саме: $t_{опл} = 50...140$ с, $Q_{опл} = 9...18$ МДж.

Для оцінки структурного стану металу в ЗТВ з'єднань рейок Р65 марки К76Ф використовували діаграму трансформації при безперервному охолодженні (ССТ-діаграма) рейкової сталі К76Ф [14]. Метою досліджень було визначення діапазону зміни величини енерговкладення $Q_{опл}$, в якому в зварному з'єднанні рейок відсутні гартівні структури (мартенсит), забезпечується перлітна структура металу ЗТВ і досягаються показники твердості згідно з вимогами чинних стандартів [11–13, 17]. При розрахунках значення струму, припуску та тривалості оплавлення, припуску на осадку та енерговкладення встановлювали для трьох різних режимів КСЗО (табл. 2). Розрахунковий розподіл температури в ЗТВ з'єднань при КСЗО рейок Р65 (60E1) марки К76Ф для режимів 1–3 наведено на рис. 11.

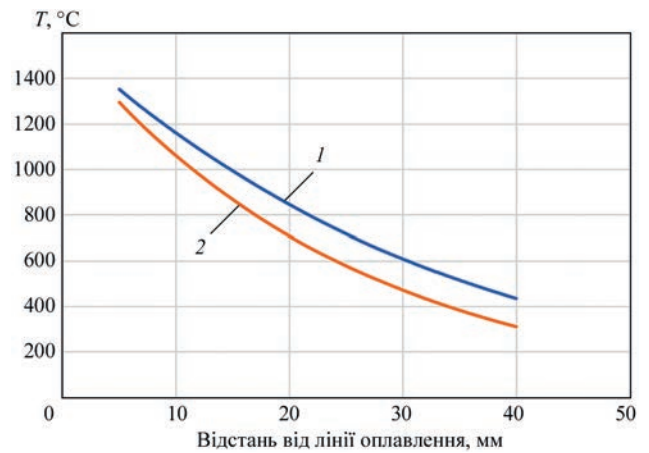


Рис. 10. Розподіл температури по осі зварного з'єднання рейок при КСЗО з різною величиною тривалості оплавлення $t_{опл}$, с: 1 – 120; 2 – 90

Для оцінки структурного стану металу в ЗТВ з'єднань рейок розрахункові криві охолодження (логарифмічна шкала часу) для різних режимів КСЗО накладали на діаграму трансформації при безперервному охолодженні рейкової сталі К76Ф. ССТ-діаграма сталі К76Ф з максимальним вмістом вуглецю в межах нормативних вимог [24] і розрахункові криві охолодження з'єднань для значення енерговкладення при КСЗО $Q_{опл} = 9,0; 9,7; 12,6; 16,2$ МДж наведено на рис. 12. Аналіз даних рис. 12 показує, що для $Q_{опл} = 9$ МДж (в межах режиму 1) максимальна швидкість охолодження по лінії з'єднання складає $W_{8/5} = 8,7$ °C/с, крива охолодження частково міститься в межах бейнітної області, значення твердості досягає 395 HV30. Наявність бейніту в структурі металу зварного стика рейок не допускається, тому режим 1 при значенні $Q_{опл} = 9$ МДж є неприйнятним за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання при дослідженні мікроструктури [17]. Для $Q_{опл} = 12,6$ МДж (в межах режиму 2) швидкість охолодження по лінії з'єднання складає $W_{8/5} = 3,75$ °C/с, крива охолодження міститься в межах області перлітного перетворення, значення твердості досягає 380 HV30, що відповідає вимогам чинних нормативних документів. Для $Q_{опл} = 16,2$ МДж (в межах режиму 3) швидкість охолодження по лінії з'єднання складає $W_{8/5} = 2,75$ °C/с, крива охолодження повністю лежить в межах області перлітного перетворення.

Таблиця 2. Режими КСЗО рейок Р65 марки К76Ф

Параметр	Режим КСЗО		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Тривалість оплавлення $t_{опл}$, с	50...60	70...90	110...140
Первинний струм при оплавленні I , А	370...390		
Припуск на оплавлення $\Delta_{опл}$, мм	7...8	9...12	14...15
Величина енерговкладення $Q_{опл}$, МДж	9...10,8	11,5...14,0	14,4...18

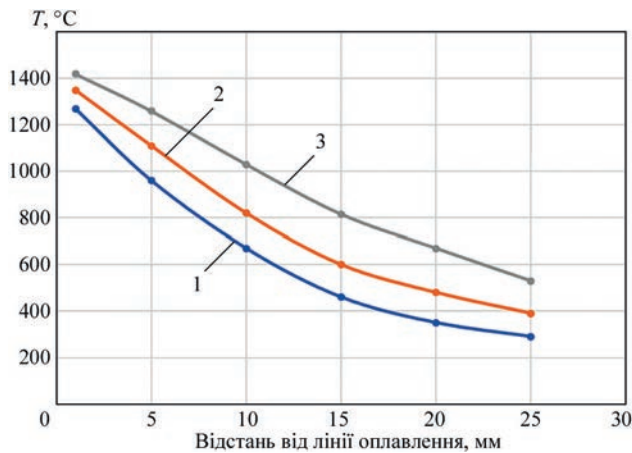


Рис. 11. Розподіл температури в ЗТВ перед осадкою при ПО рейок Р65 (60Е1) на режимах 1–3

ня, значення твердості досягає 368 HV30. Таким чином, при КСЗО на режимах 2 і 3 зварні стики відповідають нормативним вимогам за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання [17].

Розрахунковим шляхом визначено мінімальні значення тривалості процесу оплавлення $t_{опл\ min} = 55\ c$ і енерговкладення $Q_{опл\ min} = 9,7\ МДж$ при КСЗО термічнозміцнених рейок К76Ф з максимальним вмістом вуглецю в межах нормативних вимог, при яких швидкість охолодження по лінії з'єднання не перевищує $W_{8/5} = 7,0\ ^\circ C/c$ і забезпечується відсутність у зоні з'єднання бейніту та мартенситу.

Виконувалося відпрацювання технологічних режимів КСЗО рейок типу Р65 (60Е1) марок К76Ф і R350НТ за результатами механічних випробувань і металографічних досліджень. Проводили механічні випробування на статичний поперечний згин [11–13, 17] зварних стиків рейок, виконаних

на різних режимах КСЗО (див. табл. 2). Результати випробувань наведено в табл. 3 і 4.

Очевидно, що тільки режим 2 відповідає нормативним вимогам за величинами стріли прогину та руйнівного навантаження зварних стиків рейок К76Ф і R350НТ. Після випробувань на статичний згин зварних стиків рейок К76Ф, виконаних КСЗО на режимі 1, проводили фрактографічний аналіз зламів. У зламах спостерігаються дефекти (рис. 13), які визначаються як «плоскі плями» або «матові плями» (МП) [23, 25, 26] загальною площею більше 15 мм², що не відповідає [11–13]. МП виділяються на поверхні зламу нерозвиненим рельєфом і відрізняються сірим кольором. У структурі МП присутні численні оплавленого виду вкраплення (рис. 13), їх основу складають частки комплексних оксидів розміром декілька мікрон, до складу яких входять марганець, кремній.

Збільшення енерговкладення при КСЗО (режим 3) призводить до зниження показників механічних властивостей при випробуваннях зварних стиків рейок на згин. Це обумовлено, перш за все, збільшенням розміру зерна по лінії з'єднання та в ЗТВ і розвитком процесу виділення доєвтектоїдного фериту по границях первинних аустенітних зерен [25]. Отже, режим 3 ($t_{опл} = 110...140\ c$, $Q_{опл} = 14,4...18\ МДж$) не відповідає вимогам [11–13], хоча є допустимим за критерієм структурного стану металу в зоні з'єднання при дослідженні мікроструктури [17]. При КСЗО на режимі 2 забезпечуються нормативні вимоги до зварних стиків рейок класу 350HV30 (К76Ф, R350НТ) за обома критеріями – структурного стану металу та показників механічних властивостей з'єднань при випробуваннях на згин.

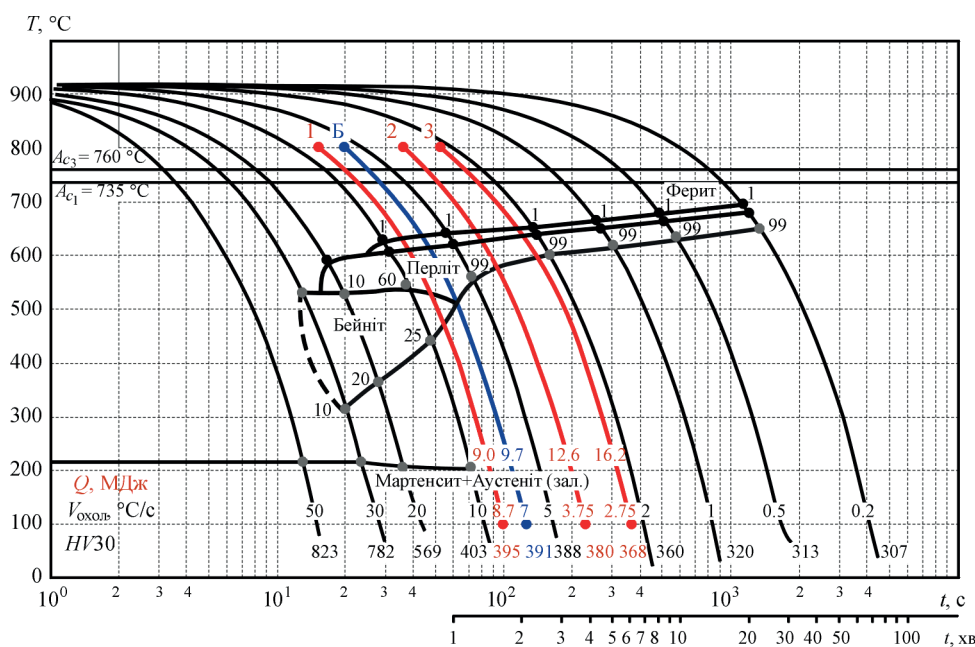


Рис. 12. CCT-діаграма сталі К76Ф [24] та розрахункові криві охолодження рейок, виконаних КСЗО з різною величиною енерговкладення $Q_{опл}$, МДж

Проводилися металографічні дослідження зварних з'єднань рейок марки К76Ф і R350НТ, отриманих при КСЗО на режимі 2. Макрошліф, мікроструктура, РЕМ-зображення металу в зоні з'єднання та розподіл твердості зварних стиків рейок марки R350НТ наведено на рис. 14. У межах ЗТВ спостерігається зниження твердості до 280 НВ30, що обумовлено процесом сфероїдизації цементиту в зоні неповної перекристалізації. Це є характерним для зварних з'єднань термічнозміцнених рейок зі сталей евтектоїдного класу [26–30]. Протяжність таких ділянок з обох боків від лінії з'єднання не перевищує 4 мм, загальна ширина ЗТВ становить 24...29 мм, що відповідає вимогам [17].

За результатами розрахунків та експериментальних досліджень термічних циклів при КСЗО, макроаналізу, металографічних досліджень, механічних випробувань зварних з'єднань рейок визначено спільний діапазон зміни $Q_{опл}$ при КСЗО термічнозміцнених рейок марок К76Ф, R350НТ, в якому забезпечуються формування якісних з'єднань, які задовольняють вимоги чинних нормативних документів для зварних стиків рейок, а саме: величина енерговкладення при оплавленні повина становити $Q_{опл} = 11,88...14,0$ МДж. Варіювання величини енерговкладення $Q_{опл}$ у визначених межах забезпечує задану швидкість охолодження зварних стиків рейок в інтервалі температур перетворення аустеніту та обумовлює утворення в зоні з'єднання високодисперсного пластинчастого перліту без структурних складових мартенситу й бейніту.

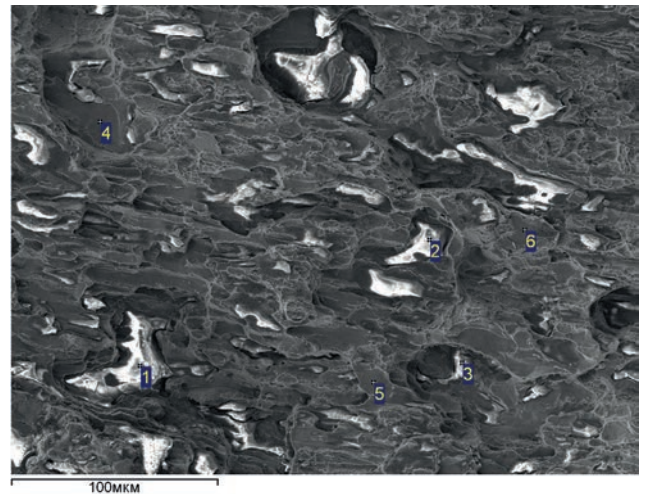
Визначений діапазон оптимальних значень $Q_{опл}$ використано при розробці та відпрацюванні технологічних режимів КСЗО рейок різних марок (R350НТ, R350ЛНТ, М76, Е76, Е76Ф, К76, К76Ф) і виробників на всіх рейкозварювальних підприємствах АТ «Укрзалізниця». На основі результа-

Таблиця 3. Результати випробувань зварних стиків рейок Р65 марки К76Ф

Номер режиму	Руйнівне навантаження, кН	Стріла прогину, мм
Вимоги [13]	≥ 1650	≥ 30
Режим 1	$\frac{1950...2250}{1950}$	$\frac{27...32}{28}$
Режим 2	$\frac{2000...2300}{2150}$	$\frac{35...45}{38}$
Режим 3	$\frac{1800...2000}{1900}$	$\frac{25...34}{29}$

Таблиця 4. Результати випробувань зварних стиків рейок 60Е1 марки R350НТ

Режим КСЗО	Руйнівне навантаження, кН	Стріла прогину, мм
Вимоги [13]	≥ 1650	≥ 30
Режим 1	$\frac{1900...2100}{1900}$	$\frac{27...31}{28}$
Режим 2	$\frac{2100...2350}{2200}$	$\frac{34...41}{37}$



Спектр	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe
1	1.51	46.66	0.00	22.15	0.00	24.77	4.90
2	20.02	43.54	0.23	15.99	0.11	17.14	2.96
3	1.50	37.53	0.06	20.94	0.08	33.93	5.73
4	1.83	0.54	0.00	0.40	0.00	0.76	96.47
5	2.12	1.49	0.08	0.46	0.06	1.65	94.13
6	0.87	0.52	0.00	0.27	0.00	0.08	98.26

Рис. 13. РЕМ-зображення та результати МРСА матової плями у зламі з'єднань рейок К76Ф при КСЗО, режим 1

тів досліджень удосконалено технологію КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок [31], розроблено блок вимірювальних перетворювачів [32] і алгоритм керування процесом КСЗО з керованим режимом охолодження зварних стиків [33], який адаптовано до існуючих програм системи керування рейкозварювальних машин К922-1 і К1000. За рахунок дозованого енерговкладення в процесі оплавлення при КСЗО реалізовано можливість керованого охолодження зварних стиків рейок для гарантування їх відповідності вимогам чинних стандартів щодо показників твердості та структурного стану металу зони з'єднання (відсутність мартенситу й бейніту).

Описана вище методологія розрахунково-експериментальних досліджень була використана при визначенні допустимих діапазонів зміни технологічних параметрів процесу КСЗО елементів залізничних хрестовин. Заміна рейок М76 зі сталей мартенівського виробництва на термічнозміцнені рейки К76Ф і R350НТ із конверторної сталі вимагала вдосконалення технології КСЗО осердя хрестовини зі сталі 110Г13Л з рейковими закінченнями зі сталі К76Ф через перехідний елемент (ПЕ) із аустенітної хромонікелевої сталі 08Х18Н10Т. Проблеми, що є характерними для зварювання різнорідних сталей, пов'язані зі структурною та хімічною неоднорідністю зони з'єднання, можливістю утворення крихкого проміжного прошарку змінного хімічного складу, зокрема ділянок з мартенситною структурою. Проблему вирішували шляхом застосування технології КСЗО пульсуючим оплавленням, яка забезпечує реалізацію зада-

них термічних циклів для запобігання утворенню крихких структурних складових у комбінованому з'єднанні сталей 110Г13Л, 08Х18Н10Т, К76Ф і для отримання регламентованої перлітної структури в ЗТВ рейкової сталі К76Ф [32].

За допомогою алгоритму чисельного вирішення тривимірного рівняння теплопровідності при початкових і граничних умовах, що відповідають реальним умовам зварювання зразків, отримано термічні цикли при КСЗО сталі К76Ф з ПЕ із аустенітної сталі 08Х18Н10Т (стик 1) та сталі 110Г13Л з ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т (стик 2). Ви-

значено діапазони зміни основних технологічних параметрів процесу КСЗО, при яких у процесі оплавлення рейок зі сталей К76Ф, 110Г13Л та 08Х18Н10Т забезпечується їх рівномірне нагрівання по перерізу та довжині, достатнє для виконання деформації на задану величину при осадці.

За розрахунковими та експериментальними даними оцінювали вплив термічного циклу КСЗО другого стика на структурну стабільність металу в ЗТВ першого стика. Встановлено, що відсутність крихких карбідів хрому в ЗТВ обох стиків комбінованого з'єднання забезпечується за рахунок реа-

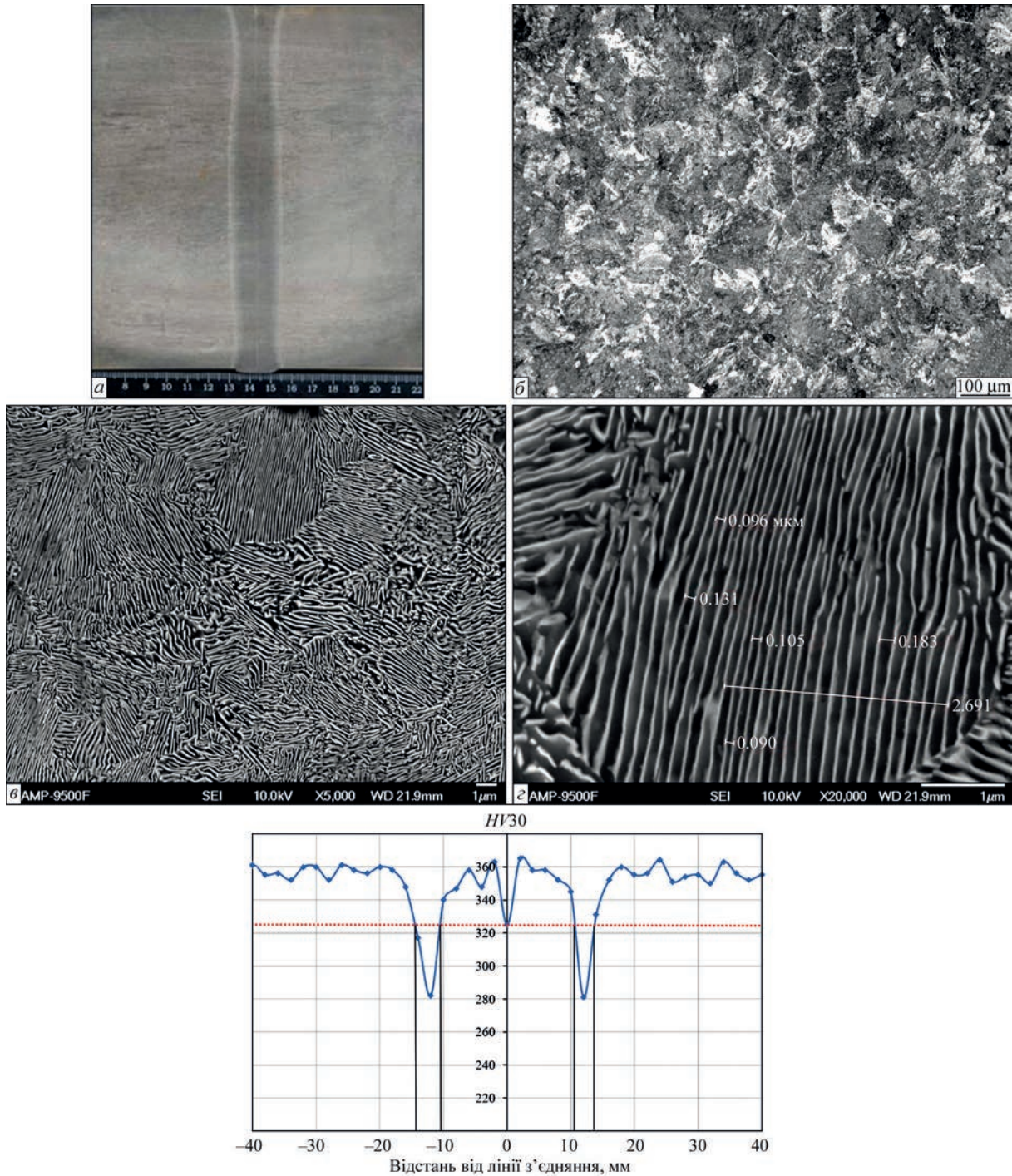


Рис. 14. Макрошліф (а), мікроструктура $\times 100$ (б), РЕМ-зображення $\times 5000$ (в) та $\times 20000$ (г) і розподіл твердості в з'єднанні рейки R350HT при КСЗО (д), режим 2

лізації заданих температурно-часових умов КСЗО пульсуючим оплавленням, при яких не відбувається суттєвої дифузії вуглецю в зоні з'єднання сталей К76Ф і 08Х18Н10Т при умові оптимізації ширини ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т.

Оцінювали можливі структурні зміни в металі першого стику з боку сталі К76Ф при ширині ПЕ $h_{\text{ПЕ}} = 10$ мм на різній відстані L від лінії з'єднання (ЛЗ) сталей К76Ф + 08Х18Н10Т: $L = 0, 5, 10, 15$ мм [33]. Зокрема встановлено, що термічний цикл КСЗО другого стику при заданій величині енерговкладення $Q_{\text{опл}}$ може призводити до нагрівання сталі К76Ф у зоні з'єднання першого стику до температури нижче або вище ніж температури структурних перетворень $T(Ac_1) = 735$ °С, $T(Ac_2) = 760$ °С (рис. 15) у залежності від ширини ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т.

Для заданого режиму КСЗО другого стику визначали мінімальну ширину ПЕ зі сталі 08Х18Н10Т, при якій не відбувається нагрів стику 1 до температур $T > T(Ac_1)$, і унеможлижуються негативні структурні перетворення в стику 1. Зокрема встановлено, що для режиму КСЗО другого стику з величиною енерговкладення $Q_{\text{опл}} = 14,4$ МДж при ширині ПЕ $h_{\text{ПЕ}} \geq 21$ мм відбувається нагрів першого стику до температури, нижче за $T(Ac_1) = 735$ °С, що потенційно не призводить до утворення гартівних структур у з'єднанні сталей К76Ф + 08Х18Н10Т, а режим нагріву відповідає короткочасному «відпуску» для сталі К76Ф [33].

При використанні удосконаленої технології КСЗО забезпечується отримання перлітної структури заданої дисперсності (сорбітно-трооститної) у стику 1 з боку рейкової сталі К76Ф; зварні залізничні хрестовини відповідають нормативним вимогам [34].

Удосконалення системи забезпечення якості з'єднань при КСЗО залізничних рейок. У відділі «Стикове зварювання» ІЕЗ розроблені, впроваджені у виробництво та протягом багатьох років успішно використовуються комп'ютеризовані системи контролю якості з'єднань при різних способах зварювання тиском. Для КСЗО залізничних рейок розроблена трирівнева система забезпечення якості зварних стиків, яка передбачає:

- рівень 1 – розробку ефективної технології та затвердження режимів КСЗО для конкретних типів і марок залізничних рейок відповідно до вимог чинних нормативних документів;
- рівень 2 – виконання операційного контролю основних параметрів процесу КСЗО в реальних виробничих умовах, порівняння із встановленими допустимими межами їх відхилень, видача рапорту (протоколів) про відповідність зварних стиків встановленим вимогам;

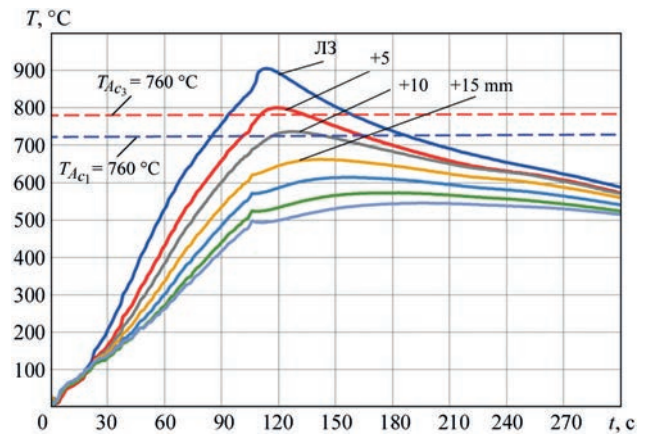


Рис. 15. Термічні цикли в першому стикі з боку сталі К76Ф при КСЗО другого стику при ширині $h_{\text{ПЕ}} = 10$ мм (експериментальні дані)

- рівень 3 – статистичний аналіз протоколів КСЗО залізничних рейок, які було виконано на всіх РЗП і переданих до діагностичного центру АТ «Укрзалізниця».

Реалізація рівня 1 системи забезпечення якості здійснюється на основі вимог до зварних з'єднань залізничних рейок, передбачених [11–13, 17]. При розробці технології та режимів КСЗО для наявних типу та марки залізничних рейок, а також конкретного рейкозварювального комплексу, фахівці відділу «Стикове зварювання» використовують результати руйнівного та неруйнівного контролю, металографічних досліджень і механічних випробувань зварних стиків, які виконуються у випробувальній лабораторії ІЕЗ, акредитованій відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019.

З метою реалізації рівня 2 забезпечення якості, тобто для стабільного відтворення процесу зварювання рейок, контролю основних його параметрів, розроблено комп'ютеризовану систему контролю та керування процесом КСЗО, яка дозволяє в реальних виробничих умовах підтримувати оптимальний режим оплавлення, значною мірою незалежно від умов експлуатації. Система складається з промислового комп'ютера, контролера та відповідних датчиків. При зварюванні кожного стику може проводитися самонастроювання технологічних параметрів, що забезпечує оптимізацію програм їхньої зміни на всіх етапах оплавлення й у цілому за період зварювання. Комп'ютеризована система контролю реєструє основні параметри процесу КСЗО, визначає їх допустимі відхилення від заданих величин і відповідно до встановлених алгоритмів видає оцінку якості з'єднань відразу після виконання зварювання [35].

Статистичний аналіз протоколів зварювання залізничних рейок (рівень 3), забезпечує своєчасне виявлення систематичних відхилень основних параметрів КСЗО, оптимізацію процесу та можливість діагностики діючого рейкозварювального

устаткування. Результати обчислень подаються у вигляді таблиць, діаграм і гістограм та наочно відтворюють перебіг зварювального процесу, а також його залежність від конкретної рейкозварювальної машини, режимів КСЗО, марки рейок. Статистичний аналіз протоколів КСЗО залізничних рейок успішно реалізовано спільно з АТ «Укрзалізниця».

У 2024–2025 рр. налагоджено проведення дистанційного моніторингу за дотриманням технології КСЗО всіх зварних стиків рейок за електронними рапортами зварювання, які надсилаються до Діагностичного центру АТ «Укрзалізниця» з кожної рейкозварювальної машини, оснащеної комп'ютеризованою системою контролю якості.

Підготовка рекомендацій та внесення змін до чинних нормативних документів, розробка нової редакції технічних умов на КСЗО залізничних рейок. У 2024 р. за результатами виконання науково-дослідних робіт і договорів фахівцями ІЕЗ розроблено рекомендації стосовно внесення змін і доповнень до чинних технічних умов зі зварювання залізничних рейок [11–13], які повністю враховані у новій редакції нормативних документів [36, 37]. Оцінку результатів спільних робіт викладено в листі директора Філії ЦБРК АТ «Укрзалізниця», де зазначено, що: «за результатами виконання договорів суттєво покращено технічний стан рейкозварювальних машин для забезпечення безпеки руху поїздів та сталої роботи залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану».

Удосконалення конструкції машин для КСЗО, відновлення виробництва рейкозварювальних комплексів. Надзвичайно актуальною для задоволення потреб АТ «Укрзалізниця» та інших партнерів є проблема відновлення виробництва рейкозварювальних машин, розроблених в ІЕЗ. Успішне вирішення цієї проблеми нерозривно пов'язане з удосконаленням конструкції мобільних і стаціонарних машин для КСЗО рейок під технічні вимоги кінцевого замовника та виробничі можливості компаній-виробників устаткування.

У 2023 р. чеська компанія SaZ s.r.o. у тісній співпраці з ІЕЗ налагодила серійне виготовлення дводорожніх рейкозварювальних комплексів WELDERLINER (рис. 16), оснащених мобільними машинами K922-1, які реалізують технологію КСЗО пульсуючим оплавленням. Цій події передувало суттєве доопрацювання конструкторської документації машини K922-1 під технічні вимоги виробника, конструкторський і технологічний супровід виробництва рейкозварювальних машин, який виконували фахівці ІЕЗ.

Комплекси WELDERLINER успішно пройшли всебічні випробування, передбачені європейським стандартом EN 14587-2:2009 на КСЗО рейок. Мобільна машина K922-1, яка є оригінальною роз-

робкою ІЕЗ, оснащується сучасною комп'ютеризованою системою багатофакторного контролю параметрів зварювання, швидкодіючими гідроприводами, а також пристроєм для видалення ґрату в гарячому стані без розтискання звареної ділянки рейок для охолодження зварного стика до заданої температури.

У 2024 р. ІЕЗ розробив конструкторську документацією для компанії RW Equipment & Consulting LLC (США) на мобільну рейкозварювальну машину RW1060, яка є удосконаленим варіантом машини K1045 для КСЗО залізничних рейок у важкодоступних локаціях. Партію машин типу K1045 ДП «Інженерний центр зварювання тиском» (ІЦЗТ) НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона» раніше виготовляв на замовлення компанії Progress Rail Services (США). У машині RW1060 удосконалено конструкцію струмоміцного контуру, що забезпечує суттєві переваги при експлуатації устаткування в тунелях метро, при зварюванні залізничних хрестовин з рейками в залізничній колії. При виготовленні зварювальної головки RW1060 (рис. 17) в ІЦЗТ фахівці відділу «Стикове зварювання» ІЕЗ здійснювали конструкторський супровід виробництва, при цьому оперативно вносились удосконалення, спрямовані на підвищення технологічності виготовлення вузлів і механізмів машини. Конструктивні рішення, реалізовані у машинах для КСЗО залізничних рейок у важкодоступних локаціях, запатентовані [38–41].

У 2024 р. започатковано співробітництво ІЕЗ з французькою компанією Yardway Railquip France SAS з метою надання послуг з підтримки технології і мобільного устаткування для КСЗО рейок. Планується, що успішний розвиток співпраці відкриє додаткові можливості для розширення використання розробок ІЕЗ за кордоном.

З метою відновлення виробництва стаціонарних рейкозварювальних машин K1000 для задоволення потреб АТ «Укрзалізниця» між ІЕЗ і вітчизняною компанією «Рейл Системс» укладено ліцензійний договір щодо надання права на використання конструкції, технології виготовлення та експлуатації машин для КСЗО у стаціонарних умовах. У 2024 р. вже є наявний успішний досвід з капітального ремонту машин K1000 на замовлення рейкозварювальних підприємств АТ «Укрзалізниця».

Продовжується багаторічна співпраця з Дніпровським стрілочним заводом щодо підтримки технологічного процесу виготовлення залізничних хрестовин, зокрема технології КСЗО осердя хрестовин із високосносостійкої сталі 110Г13Л з рейками зі сталей евтектоїдного класу через ПЕ із хромонікелевої сталі аустенітного класу. У 2023–2025 рр. ІЕЗ успішно виконує роботи з консультаційної підтримки технології КСЗО залізничних хрестовин, аудиту технічного стану машини



Рис. 16. Мобільна машина K922-1 (а), рейкозварювальний комплекс WELDERLINER (б, в) на комбінованому автомобільно-залізничному ходу



Рис. 17. Зварювальна головка машини RW1060 для КСЗО залізничних рейок у важкодоступних локаціях

K924M, виготовлення елементів зварювального контуру, розробки комплексу заходів з метою забезпечення заданих технічних характеристик машини K924M і продовження її експлуатаційного ресурсу.

Завдяки спільним зусиллям структурних підрозділів АТ «Укрзалізниця», ІЕЗ, вітчизняних і закордонних компаній-партнерів успішно долаються критичні виклики щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану в Україні та розширення використання вітчизняних розробок за кордоном.

Висновки

1. Проаналізовано критичні виклики щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану в Україні. Зупинка внаслідок окупації виробництва вітчизняних рейок комбінатом «Азовсталь» актуалізувала проблему зварювання старопридатних і нових рейок різних марок та заводів-виробників, з різними технологіями термозміцнення, зокрема у різноманітному поєднанні. Актуальним є вирішення проблеми подовження експлуатаційного ресурсу зварювального устаткування.

2. Для вирішення наявних проблем розроблено комплекс заходів щодо забезпечення якісного зва-

рювання рейок у стаціонарних і польових умовах при ремонті та спорудженні безстикових залізничних колій в Україні відповідно до вимог нормативних документів.

3. Реалізація у 2022–2025 рр. розробленого комплексу заходів дозволила вирішити низку проблем, пов'язаних із контактним стиковим зварюванням оплавленням (КСЗО) залізничних рейок:

- встановлено причини невідповідності зварних стиків рейок різних марок вимогам нормативних документів, розроблено рекомендації щодо недопущення виникнення дефектів і надійного виявлення можливих дефектів при неруйнівному контролю зварних стиків рейок;

- проведено аудит технічного стану наявного в АТ «Укрзалізниця» рейкозварювального устаткування та розроблено заходи для продовження його експлуатаційного ресурсу;

- удосконалено технологію та відпрацьовано технологічні режими КСЗО термічнозміцнених залізничних рейок конверторного виробництва;

- удосконалено системи забезпечення якості з'єднань при КСЗО залізничних рейок;

- удосконалено конструкції мобільних рейкозварювальних машин, відновлено виробництво устаткування для КСЗО рейок.

4. Завдяки спільним зусиллям ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, структурних підрозділів АТ «Укрзалізниця», вітчизняних і закордонних компаній-партнерів успішно долаються критичні виклики щодо забезпечення працездатності залізничної інфраструктури в умовах воєнного стану в Україні та розширення використання вітчизняних розробок за кордоном.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Костюк М.Д., Кучук-Яценко С.И. и др. (2010) Инновационный кластер «Бархатный путь» и научно-технический прорыв Украины на мировой рынок строительства скоростных железных дорог. *Наука та інновації*, 6(2), 69–86. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin6.02.069>
2. Solano-Alvarez, W., Bhadeshia, H.K.D.H. (2024) *Steels for rails Progress in Materials Science*, 146(12). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101313>
3. Ziakhor, I.V., Antipin, E.V., Didkovsky, O.V. et al. (2023) Modern technologies of welding railway rails (Review). *The Paton Welding J.*, 8, 4–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.01>
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, 11–12, 25–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2019) 60 Years of the first in the world mobile machine for flash-butt welding of rails in the field conditions. *The Paton Welding J.*, 3, 2–5. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.03>
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, 5–6, 4–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>
7. Rudenko, P.M., Gavrish, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I. et al. (2017) Influence of flash butt welding process parameters on strength characteristics of railway rail butts. *The Paton Welding J.*, 5–6, 75–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.14>
8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2018) Mathematical modeling of metal heating process in continuous flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, 10, 2–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.10.01>
9. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. (2016) Statistical control of process of flash-butt welding of rails. Two-level control system. *The Paton Welding J.*, 5–6, 13–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.02>
10. Кучук-Яценко С.И., Руденко П.М., Гавриш В.С. та ін. (2019) Система керування процесом контактного зварювання оплавленням рейок у стаціонарних і польових умовах для підвищення ресурсу та надійності залізничних колій. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 41–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.02.07>
11. ТУ УЗ 24.1-40075815-085:2019. *Рейки звичайні старопридатні. Ремонт і зварювання. Технічні умови.*
12. ТУ УЗ 24.1-40075815-109:2020. *Рейки залізничні. Зварювання стиків рейок контактним способом на підприємствах та в колії. Технічні умови.*
13. ТУ УЗ 24.1-40075815-002:2021. *Рейки нові зварені для залізниць. Технічні умови.*
14. ДСТУ 4344:2004. *Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні вимоги.* Український науково-дослідний інститут металів «УкрНДІМет», Київ, Держспоживстандарт України.
15. ДСТУ EN 13674-1:2018 (EN 13674-1:2011:2005, IDT). *Залізничний транспорт – Колія – Рейки. Частина 1. Залізничні рейки Вігноле 46 кг/м та вище.* ДП «УкрНДНЦ», Київ, Держспоживстандарт України.
16. BS EN 13674-1:2011+A1:2017. *Railway applications – Track – Rail. Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.* European Committee for Standardization.
17. ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT). *Залізничний транспорт. Колія. Стикове зварювання рейок. Частина 2. Нові класи рейок R220, R260, R260Mn та R350HT із рухомих зварювальних механізмом порівняно зі стаціонарним механізмом.* ДП «УкрНДНЦ».
18. Задорожнюк О.М., Капитанчук Л.М., Смиян О.Д., Буткова Е.И. (2013) Новые возможности для проведения металлургических исследований основного металла и сварных соединений. *Современная электрометаллургия*, 2, 36–40. <https://patonpublishinghouse.com/sem/pdf/2013/pdfarticles/02/9.pdf>
19. Рибкін В.В. та ін. (2013) *Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України.* ЦП-0285. Київ, Видавництво ТОВ «Інпрес».
20. ДСТУ 3715-1998. *Метали. Види поверхонь руйнування (зломів).* Інститут проблем лиття НАН України, Київ, Держстандарт України.
21. ДСТУ EN ISO 6520:2015. (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT) *Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 2. Зварювання тиском.*
22. ДСТУ 7175:2010. *Метали та сплави. Методи металографічного контролювання Терміни та визначення понять.* Київ, Держспоживстандарт України.
23. Shvets, V.I., Ziakhor, I.V., Kapitanchuk, L.M. (2023) Features of formation and transformation of oxides in flash-butt welding of K76F rails. *The Paton Welding J.*, 7, 16–24 DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.07.02>
24. Бабаченко О., Кононенко Г., Хулін А. (2018) Дослідження кінетики розпаду аустеніту при безперервному охолодженні сталі К76Ф для рейок звичайних для залізниць широкої колії. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. Сборник научных трудов ИЧМ*, 32, 317–327.
25. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V. et al. (2013) Defects of joints of high-strength rails produced using flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, 9, 2–8.
26. Mousavizade, M., Farhangi, H. (2010) Characterization of surface defects associated with flash butt-welded pearlitic rails and their contribution to overload and fatigue failures. *Advanced Materials Research*, 83–86, 1262–1269. DOI: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.1262>
27. Porcaro, R.R., Faria, G.L., Godefroid, L.B. et al. (2019) Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail. *J. Mater. Process. Tech.*, 270, 20–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.013>

28. Micenko, P., Muruganant, M., Li Huijun, Xu Xiaofeng (2013) *Double dip hardness profiles in rail weld heat-affected zone – literature and research review report*. CRC Project Report, R3.121, Brisbane, Australia.
29. Weingrill, L., Krutzler, J., Enzinger, N. (2016) Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*, **879**, 2088–2093. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088>
30. Micheletto, A., Cookson, J., Pang, Y. et al. (2020) The structural integrity of flash-butt welded premium rail steel – Evaluation of strength, microstructure and defects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. of Rail and Rapid Transit*, **235(8)**, 1006–1012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720973138>
31. Антипін С., Зяxor I., Дідковський О. та ін. (2023) Технологія контактного стикового зварювання оплавленням термічнозміцнених рейок. *Збірка тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» 25–26 травня 2023 р., Чернігів, Україна. Том 2*, сс. 91–92. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/28253>
32. Kavunichenko, O.V., Ziakhor, I.V., Shylo, Yu.A. et al. (2024) Thermal cycles and microstructure of the flash butt welded joints of 110G13L and K76F steel rails through 08Xh18N10T steel insert. *The Paton Welding J.*, **3**, 9–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.03.02>
33. Шило Ю.А., Зяxor I.B., Кавуніченко О.В. та ін. (2025) Термічні цикли при контактному стиковому зварюванні оплавленням залізничних хрестовин. *Збірка тез XV міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» 22–23 травня 2025 р., Чернігів, Україна, Том 2*, с. 89. https://drive.google.com/file/d/1LZk8Ezf_00sYSOPtmLeR8y3PuVnIJeys/view
34. EN14587-3:2012. *Railway applications – Track – Rail. Part 3: Welding in association with crossing construction*. European Committee for Standardization
35. Kuchuk-Yatsenko, S., Rudenko, P., Gavrish, V. et al. (2020) Operational control as a means of the evaluation of quality of welded connections for flash-butt welding of modern high-strength steels. *Science and Innovation*, **16**, 72–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/scin16.02.072>
36. ТУ УЗ 24.1-40075815-002:2024. *Рейки нові зварені для залізниць. Технічні умови*. Філія «НДКПІ залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», дата набуття чинності 10.05.2025.
37. ТУ УЗ 24.1-40075815-139:2025. *Рейки старопридатні. Ремонт та зварювання стиків в колії та поза межами колії. Технічні умови*. Філія «НДКПІ залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», дата набуття чинності 10.05.2025.
38. Зяxor I.B., Коваль М.І., Дідковський О.В. та ін. (2022) *Машина для контактного стикового зварювання рейок*. Патент України на корисну модель №151797, опубл. 14.09.2022, бюл. № 37. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1705612/>
39. Зяxor I.B., Коваль М.І., Дідковський О.В. та ін. (2024) *Машина для контактного стикового зварювання рейок*. Патент України на винахід №128177, опубл. 24.04.2024, бюл. № 17. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796632/>
40. Зяxor I.B., Коваль М.І., Дідковський О.В. та ін. (2024) *Машина для контактного стикового зварювання рейок*. Патент України на корисну модель №156326, опубл. 05.06.2024, бюл. № 23. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1803859/>
41. Зяxor I.B., Коваль М.І., Дідковський О.В. та ін. (2024) *Машина для контактного стикового зварювання рейок*. Патент на корисну модель № 157480, опубл. 23.10.2024, бюл. №43. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1824287>
- Paton Welding J.*, **8**, 4–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.01>
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, **11–12**, 25–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2019) 60 years of the first in the world mobile machine for flash-butt welding of rails in the field conditions. *The Paton Welding J.*, **3**, 2–5. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.03>
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, **5–6**, 4–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>
7. Rudenko, P.M., Gavrish, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I. et al. (2017) Influence of flash-butt welding process parameters on strength characteristics of railway rail butts. *The Paton Welding J.*, **5–6**, 75–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.14>
8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2018) Mathematical modeling of metal heating process in continuous flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **10**, 2–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.10.01>
9. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. (2016) Statistical control of process of flash-butt welding of rails. Two-level control system. *The Paton Welding J.*, **5–6**, 13–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.02>
10. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. et al. (2019) System of controlling the process of flash-butt welding of rails under stationary and field conditions to extend the service life and reliability of railway tracks. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 41–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.02.07>
11. TU UZ 24.1-40075815-085:2019: *Ordinary used rails. Repair and welding. Specifications* [in Ukrainian].
12. TU UZ 24.1-40075815-109:2020: *Railway rails. Welding of rail butt joints by contact method at enterprises and on the track. Specifications* [in Ukrainian].
13. TU UZ 24.1-40075815-002:2021: *New welded rails for railways. Specifications* [in Ukrainian].
14. DSTU 4344:2004: *Ordinary rails for broad gauge railways. General technical requirements*. Ukrainian Research Institute of Metals UkrNDIMet. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
15. DSTU EN 13674-1:2018 (EN 13674-1:2011:2005, IDT): *Railway transport – Track – Rails. Pt 1: Railway rails Vignole 46 kg/m and above*. Kyiv, SE UkrNDNTs.
16. BS EN 13674-1:2011+A1:2017: *Railway applications – Track – Rail. Pt 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*. European Committee for Standardization.
17. DSTU EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT): *Railway transport. Track. Butt welding of rails. Pt 2. New rail classes R220, R260, R260Mn and R350HT with a mobile welding mechanism compared to a stationary mechanism*. Kyiv, SE UkrNDNTs [in Ukrainian].
18. Zadorozhnyuk, O.M., Kapitanchuk, L.M., Smiyan, O.D., Butkova, E.I. (2013) New possibilities to carry out metals science investigations of base metal and welded joints. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 36–40 [in Russian]. DOI: <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/sem/2013/02/08>
19. Rybkin, V.V. et al. (2013) *Classification and catalog of defects and damage of rails in railways of Ukraine*. TsP-0285. Kyiv, Inpres [in Ukrainian].
20. DSTU 3715–1998: *Metals. Types of fracture surfaces (ruptures)*. Institute of Casting Problems of the NASU. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
21. DSTU EN ISO 6520:2015 (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT) *Welding and allied processes. Classification of geometric imperfections in metallic materials. Pt 2. Pressure welding* [in Ukrainian].
22. DSTU 7175:2010: *Metals and alloys. Methods of metallographic testing. Terms and definitions of concepts*. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
23. Shvets, V.I., Ziakhor, I.V., Kapitanchuk, L.M. (2023) Features of formation and transformation of oxides in flash-

- butt welding of K76F rails. *The Paton Welding J.*, **7**, 16–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.07>
24. Babachenko, O., Kononenko, G., Khulin, A. (2018) Investigation of austenite decomposition kinetics in continuous cooling of K76F steel for ordinary rails of broad gauge railways. Fundamental and Applied Problem of Ferrous Metallurgy. *Sbornik IChM*, **32**, 317–327 [in Ukrainian].
 25. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V. et al. (2013) Defects of joints of high-strength rails produced using flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 2–8.
 26. Mousavizade, M., Farhangi, H. (2010) Characterization of surface defects associated with flash-butt welded pearlitic rails and their contribution to overload and fatigue failures. *Adv. Materials Research*, **83–86**, 1262–1269. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.1262>
 27. Porcaro, R.R., Faria, G.L., Godefroid, L.B. et al. (2019) Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail. *J. Mater. Process. Tech.*, **270**, 20–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.013>
 28. Micenko, P., Muruganant, M., Huijun, Li, Xu Xiaofeng (2013) *Double dip hardness profiles in rail weld heat-affected zone — Literature and research review report*. CRC Project Report, R3.121, Brisbane, Australia.
 29. Weingrill, L., Krutzler, J., Enzinger, N. (2016) Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Mater. Sci. Forum*, **879**, 2088–2093. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088>
 30. Micheletto, A., Cookson, J., Pang, Y. et al. (2020) The structural integrity of flash-butt welded premium rail steel — Evaluation of strength, microstructure and defects. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt F. *J. of Rail and Rapid Transit*, **235(8)**, 1006–1012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720973138>
 31. Antipin, Ie., Ziakhor, I., Didkovsky, O. et al. (2023) Technology of flash butt welding of heat-strengthened rails. In: *Abstr. of Papers of 13th Inter. Sci.-Pract. Conf. on Complex Assurance of Quality of Technological Processes and Systems. 25–26 May 2023, Chernihiv, Ukraine*, Vol. 2, 91–92 [in Ukrainian]. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/28253>
 32. Kavunichenko, O.V., Ziakhor, I.V., Shylo, Yu.A. et al. (2024) Thermal cycles and microstructure of the flash butt welded joints of 110G13L and K76F steel rails through 08Xh18N10T steel insert. *The Paton Welding J.*, **3**, 9–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.03.02>
 33. Shylo, Yu.A., Ziakhor, I.V., Kavunichenko, O.V. et al. (2025) Thermal cycles in contact flash butt welding of railway frogs. In: *Abstr. of Papers of 13th Inter. Sci.-Pract. Conf. on Complex Assurance of Quality of Technological Process and Systems. 22–23 May 2025, Chernihiv, Ukraine*, Vol. 2, 89 [in Ukrainian]. https://drive.google.com/file/d/1LZk8Ezf_0OsYSOPtmLeR8y3PuVnIJeys/view
 34. EN 14587-3:2012: *Railway applications – Track – Rail*. Pt 3: Welding in association with crossing construction. European Committee for Standardization.
 35. Kuchuk-Yatsenko, S., Rudenko, P., Gavrish, V. et al. (2020) Operational control as a means of the evaluation of quality of welded connections for flash-butt welding of modern high-strength steels, *Nauka ta Innovatsii*, **16**, 72–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/scin16.02.072>
 36. TU UZ 24.1-40075815-002:2024: *New welded rails for railways. Technical conditions*. Branch of NDKTI of Railway Transport, JSC Ukrzaliznytsia. Effective date 10.05.2025 [in Ukrainian].
 37. TU UZ 24.1-40075815-139:2025: *Old rails. Repair and welding of butt joints in the track and outside the track. Technical conditions*. Branch of NDKTI of Railway Transport, JSC Ukrzaliznytsia. Effective date 10.05.2025 [in Ukrainian].
 38. Ziakhor, I.V., Koval, M.Y., Didkovsky, O.V. et al. (2022) *Machine for resistance butt welding of rails*. Pat. of Ukraine on utility model, 151797, Publ. 14.09.2022 [in Ukrainian]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1705612/>
 39. Ziakhor, I.V., Koval, M.Y., Didkovsky, O.V. et al. (2022) *Machine for resistance butt welding of rails*. Pat. of Ukraine on invention, 128177, Publ. 24.04.2024 [in Ukrainian]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796632/>
 40. Ziakhor, I.V., Koval, M.Y., Didkovsky, O.V. et al. (2024) *Machine for resistance butt welding of rails*. Pat. of Ukraine on utility model, 156326, Publ. 05.06.2024 [in Ukrainian]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1803859/>
 41. Ziakhor, I.V., Koval, M.Y., Didkovsky, O.V. et al. (2024) *Machine for resistance butt welding of rails*. Pat. of Ukraine on utility model, 157480, Publ. 23.10.2024 [in Ukrainian]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1824287/>

URGENT PROBLEMS OF WELDING RAILWAY RAILS UNDER MARTIAL LAW IN UKRAINE

I.V. Ziakhor¹, Ye.V. Antipin¹, O.V. Didkovskiy¹, A.M. Levchuk¹, V.V. Kalyuzhny², V.V. Ozyumenko², O.A. Velykoivanenko¹, P.M. Rudenko¹, Yu.A. Shylo¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: zyakhor2@ukr.net

²Branch «Center for Track Construction and Repair» of the JSC «Ukrainian Railways». 5B Zaliznychne Shosse, 01103, Kyiv, Ukraine

Rail joining in stationary and field conditions is mainly performed by flash butt welding (FBW), which has been successfully used for many years on the railways of Ukraine and abroad. The article analyzes the critical challenges for ensuring the operability of the railway infrastructure under martial law in Ukraine. To solve urgent problems, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine (PWI) together with the Branch «Center for Track Construction and Repair» of the JSC «Ukrainian Railways» have developed a set of measures to ensure high-quality welding of rails in stationary and field conditions during the repair and construction of continuous welded rails in accordance with the requirements of acting regulatory documents. The results of works (research, technological, scientific and technical expertises) on the implementation of these measures for the period of 2022–2025 are presented. In particular, the technical condition of rail welding machines was successfully audited, the technology was improved and technological modes of FBW of railway rails were practiced, the system of quality assurance of joints during FBW of railway rails was improved, new revisions of regulatory documents for FBW of railway rails were prepared, the works are being conducted to update the design of FBW machines, cooperation with companies is developed to renew the production of rail welding equipment in Ukraine. 41 Ref., 4 Tabl., 17 Fig.

Keywords: railway rails, welded joint, flash butt welding, railroad frog

Отримано 20.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 28.07.2025

Прийнято 23.09.2025

ОТРИМАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МЕТАЛОМАТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ «Ti-6Al-4V + WC» МЕТОДОМ АДИТИВНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

В.М. Коржик¹, А.А. Гринюк², О.А. Бабич², О.М. Берднікова¹, Є.В. Ілляшенко¹, О.І. Бушма¹

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

²Чжецзянський науково-дослідний інститут зварювальних технологій, КНР.

Експериментально підтверджена можливість 3D друку методом адитивного плазмово-дугового наплавлення об'ємних виробів із композиційних функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів, в яких матрицею є титановий сплав Ti-6Al-4V, а армуючою фазою – карбід вольфраму. Технологія адитивного плазмово-дугового наплавлення з одночасним подаванням у плазмову дугу порошку або присаджувального дроту титанового сплаву Ti6Al4V Grade 5 та сферичного порошку WC дозволяє отримувати об'ємні зразки із функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів типу «стінка», в яких вміст карбиду вольфраму за їх висотою змінюється від 0 до 50 об. % із відповідною зміною показника твердості від HRC 32 для нижніх (глибинних) шарів і до HRC 56...66 і вище в напрямку до поверхневих шарів. Шляхом вибору режимів плазмового наплення та погонної енергії можна змінювати твердість, мікроструктуру та мікротвердість матриці матеріалу наплавлених шарів, у тому числі ступінь розплавлення частинок сферичного порошку WC, а саме – зберігати їх сферичну форму із мікротвердістю $HV_{0,1} = 2172...3796$ або досягати їх часткового та повного розплавлення. У випадку збереження сферичної форми частинок WC, які знаходяться в матриці із титанового сплаву Ti-6Al-4V, характерною є наявність металургійного зв'язку їх із цією матрицею. Встановлено, що границя міцності отриманих матеріалів для випадку адитивного наплавлення присадним дротом Ti-6Al-4V з добавкою порошку WC до 50 об. %, досягає показника $\sigma_b = 666,8$ МПа, що відповідає 75 % границі міцності ідентичного за хімічним складом сплаву Ti6Al4V Grade 5 (лист відпалений), який виступає в якості матриці досліджуваного композиційного матеріалу. Значення ударної в'язкості зразків з'єднань типу «стінка» з наплавленими шарами композиційного матеріалу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + порошок WC» досягає до 70...80 % рівня цього показника листового титанового сплаву Ti-6Al-4V Grade 5. Бібліогр. 36, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: 3D друк, адитивне плазмово-дугове наплавлення, титанові сплави, карбід вольфраму, функціонально-градієнтні матеріали, структура, механічні властивості

Вступ. У сучасному адитивному виробництві для отримання готового металевого виробу переважно використовують два основні підходи [1–18]: пошарове селективне плавлення порошку або пряме пошарове вирощування стінки деталі із матеріалу у вигляді порошку або дроту. Для процесів селективного плавлення порошку використовують енергію лазерного (SLM) або електронного променя (EBSM). Обидва ці процеси забезпечують формування деталей згідно із заданими в моделях розмірами, після 3D друку даними способами у більшості випадків не використовують механічну обробку поверхні деталі. Але у цих способів є низка суттєвих недоліків, а саме: обмежені розміри деталей; необхідність використання дрібнодисперсних порошоків (переважно 20...63, 20...105 мкм) з високим коефіцієнтом сферичності форми; необхідність використання в рази більшу кількість порошку, ніж об'єм готової деталі; при вирощуванні деталі з градієнтними відмінностями механічних властивостей при поступовому використанні порошоків різного хімічного складу відбувається їх змішування поза зоною сплавлення, що зумовлює

необхідність відбракування порошку, який лишається в установці після завершення друку.

Серед адитивних технологій, які використовують методи наплавлення, на даний час набули найбільшого розповсюдження процеси DED-W/WAAM/3DMP (Wire Direct Energy Deposition/Wire Arc Additive Manufacturing/3D Metal Prin) або WAAM – адитивне наплавлення металевим дротом, в які входять дугові процеси із використанням неплавкого та плавкого електрода, а також процеси із коротким замиканням дугового проміжку (типу CMT – Cold Metal Transfer) [19, 20]. Особлива увага приділяється процесу Plasma Metal Deposition (PMD) або адитивному плазмово-дуговому наплавленню (АПДН), який використовує енергію плазмової дуги та має значний потенціал, як з точки зору реалізації широких технологічних можливостей, так і отримання нових матеріалів у процесі 3D друку [20].

Потрібно зазначити такі переваги та ширші технологічні можливості PMD перед методами WAAM [20]:

– широке регулювання продуктивності 3D друку (0,02...25 кг/год) та ступеня деталізації об'єм-

Коржик В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Бабич О.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5633-5721>, Берднікова О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>, Ілляшенко Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>, Бушма О.І. – <https://orcid.org/0009-0005-6611-4507>

© В.М. Коржик, А.А. Гринюк, О.А. Бабич, О.М. Берднікова, Є.В. Ілляшенко, О.І. Бушма, 2025

них елементів (завширшки від 2,0...2,5 до 10...20 мм) шляхом реалізації процесу, як у режимі мікроплазмового наплавлення низькоамперною плазмовою дугою (при струмах 5...35 А), так і при струмах 50...450 А та вище (у залежності від потужності джерела живлення зварювального струму установки плазмового наплавлення);

– великий діапазон регулювання погонної енергії, зони нагріву та глибини проплавлення попередніх наплавлених шарів шляхом АПДН із використанням прямої або дотичної плазмової дуги;

– 3D друк на постійному струмі прямої та оберненої полярності, змінному струмі, у тому числі реалізація процесу катодного очищення та руйнування оксидних плівок при наплавленні легких металів і сплавів з тугоплавкими оксидними плівками на їх поверхні;

– 3D друк із використанням від одного до чотирьох присаджувальних дротів, у тому числі із струмопровідним присаджувальним дротом з підігрівом;

– використання для 3D друку в якості присаджувального матеріалу компактних і композиційних (порошкових) дротів, порошків легких сплавів і тугоплавких металів, композиційних порошків і механічних сумішей порошків сплавів, металокераміки, карбідів, боридів тощо;

– реалізація процесу 3D друку із використанням присадки, яка не рухається разом із плазмотроном під час наплавлення шару (металева крупка, фольга, тонкі смужки металу), що накладається по чергово після наплавлення кожного шару (процес, подібний до методів «ламінування» або селективного плавлення);

– можливість запуску плазмової дуги без додавання дроту або порошку, що дозволяє виконувати попереднє нагрівання основи або наплавлених шарів перед адитивним наплавленням.

Метою роботи є підтвердження можливості процесу адитивного плазмово-дугового наплавлення для отримання в процесі 3D друку просторових виробів із функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів, в яких у металевій матриці містяться армуючі зерна тугоплавких сполук (карбідів, боридів тощо) змінного складу.

Для досягнення цієї мети необхідно:

– шляхом адитивного плазмово-дугового наплавлення з одночасним подаванням у плазмову дугу порошку або присаджувального дроту титанового сплаву Ti-6Al-4V Grade 5 та сферичного порошку WC отримати композиційні функціонально-градієнтні матеріали, в яких матрицею є титановий сплав Ti-6Al-4V, а армувальною фазою зі змінним вмістом – карбід вольфраму;

– дослідити структуру отриманих композиційних матеріалів і можливість управління ступенем

розплавлення сферичних частинок порошку карбіду вольфраму в матриці із титанового сплаву;

– визначити основні фізико-механічні властивості отриманих композиційних матеріалів «Ti-6Al-4V + WC» у порівнянні з характеристиками матричного сплаву Ti-6Al-4V.

Матеріали та методики досліджень. Експерименти виконували на обладнанні, розробленому в рамках співробітництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) [20] (рис. 1, а, б). Для проведення досліджень отримували просторові вироби типу «стінка» розмірами від 8×4 до 8×50 мм із використанням спеціально розробленого універсального плазмотрона (рис. 1, в), який дозволяє реалізувати процес адитивного наплавлення при одночасній подачі одного та кількох порошків або при одночасній подачі порошку та присаджувального дроту [20–23]. Досліджували можливість отримання композиційного об'ємного функціонально-градієнтного матеріалу «сплав Ti-6Al-4V Grade 5 + порошок WC» шляхом реалізації наступних технологій адитивного плазмово-дугового наплавлення: шляхом одночасної подачі різнорідних порошків із двох порошкових дозаторів; шляхом подавання механічної суміші порошків з одного живильника; шляхом одночасного подавання дроту титанового сплаву та порошку карбіду вольфраму.

На першому етапі досліджень виконували плазмове наплавлення із використанням суміші порошків Ti6-Al-4V та WC. З-за різної густини порошків механічна суміш починала сепаруватися на окремі компоненти в бункері живильника подавання порошку, при цьому важко було прогнозувати наявність тієї чи іншої кількості порошку WC у наплавці.

З метою підвищення стабільності надходження порошку WC у наплавлений метал було прийнято рішення або подавати порошки WC та Ti-6Al-4V окремо з різних живильників, або подавати WC у вигляді порошку, а сплав Ti6Al4V – у вигляді дроту. Враховуючи те, що коефіцієнт використання матеріалу у вигляді дроту буде вищий, ніж такий коефіцієнт у порошку, було вирішено подавати сплав Ti6Al4V у вигляді дроту. Використовували дріт титанового сплаву Ti6Al4V діаметром 1,2 мм, а розмір частинок порошку сферичної форми карбіду вольфраму складав 50...150 мкм. Зразки типу «стінка» вирощували в процесі 3D друку на підкладці зі сплаву Ti6Al4V Grade 5 завтовшки 8 мм. Наплавлення виконували на торець зразка завширшки 8 мм і завдовжки 60 мм.

Структурні характеристики отриманих матеріалів досліджували із застосуванням комплексних методів, що включають вимірювання твердості, мікротвердості, металографічні дослідження

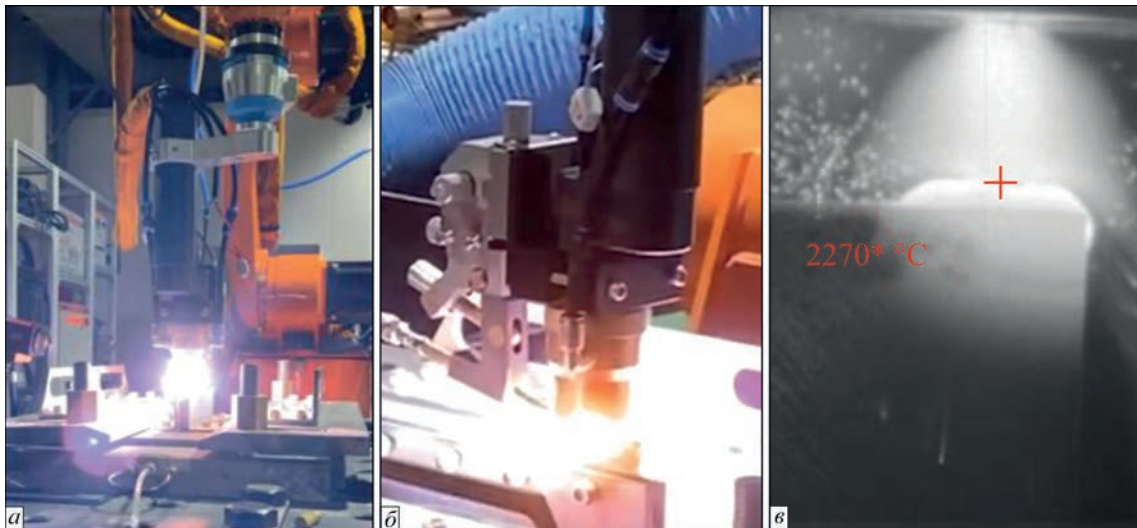


Рис. 1. Роботизований комплекс (а) і плазмотрон (б), за допомогою якого отримували об'ємні зразки типу «стінка», та процес плазмово-дугового наплавлення (в) одиночного шару завтовшки 2 мм при формуванні «стінки» із композиційного матеріалу з одночасною подачею дроту Ti-6Al-4V і сферичного порошку WC

структури, рентгеноструктурний фазовий аналіз та аналіз хімічного складу, використовуючи методику, описану в [24–29]. Твердість за Роквеллом (HRC) вимірювали на приладі Laizhou Weiyi HRS-150S, мікротвердість за Віккерсом (HV) – на приладі VH1102 (США) при навантаженні 100 г. Дослідження мікроструктури матеріалів проводили із застосуванням світлового мікроскопа Zeiss Axio Imager M2m, растрового електронного мікроскопа SEM-515 (фірми Philips, Нідерланди).

Для визначення міцності наплавленого металу на розрив було виконано зварювання листів завтовшки 4 мм зі сплаву Ti6Al4V на підкладці зі сплаву Ti6Al4V. Листи завтовшки 4 мм збирались із гарантованим зазором 4 мм (рис. 2, а) з метою формування зварного шва переважно із присадного матеріалу, а саме з дроту із титанового дроту Ti6Al4V і порошку WC. При цьому швидкість подавання титанового дроту залишалася незмінною, а змінювалось кількість порошку WC з метою його вмісту в шві у кількості 30 та 50 % від загального об'єму шва. Механічні випробування на міцність на розрив і на відносно видовження досліджуваних зразків з наплавленнями проводили на електронному універсальному приладі Instron-5988. Розмір зразків для випробувань згідно зі стандартом 12,5×3,22×128,5 мм, місце розриву всіх зразків – наплавлений матеріал. Зразки для випробувань вирізали електроіскровим різанням у вигляді «лопаток» (рис. 2, а) з титаном на краях і смужкою наплавленого матеріалу посередині з наплавленого матеріалу в зазор між двох титанових пластин (рис. 2, б). Це дозволило отримати дані щодо композиційних об'ємних зразків «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар + сплав Ti6Al4V Grade 5».

Випробування зразків із отриманих матеріалів на ударну в'язкість проводили на приладі

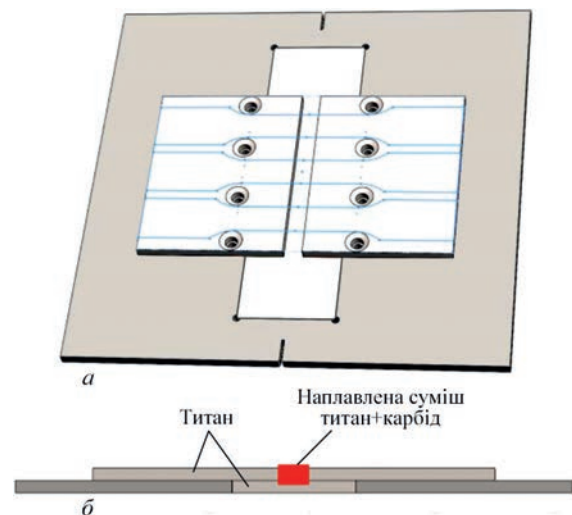


Рис. 2. Схеми розташування зразків при виконанні зварювання листів завтовшки 4 мм з метою визначення міцності металу шва на розрив

Steel Research Nike NI300C за методологією, описаною в [29–32]. Розмір зразків для випробувань 10,0×10,0×55,0 мм. З метою вимірювання ударної в'язкості зразків з наплавленнями з урахуванням зони сплавлення наплавленого матеріалу з основою випробування проводили за двома варіантами схем – із застосуванням «фронтального удару» (рис. 3, а) та «бокового удару» (рис. 3, б) з надрізом завглибшки 2 мм. Зразки для випробувань вирізали заввишки 10 мм, з яких 5 мм – підкладка і 5 мм – наплавлений шар. Це дозволило отримати дані щодо двошарових зразків «підкладка + наплавлений шар», а саме композиційного матеріалу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар».

Результати досліджень. Процес формування наплавленого одиночного шару завтовшки 2 мм при формуванні просторового виробу типу «стінка» з одночасною подачею дроту Ti-6Al-4V і карбиду вольфраму показано на рис. 1, в. Результати

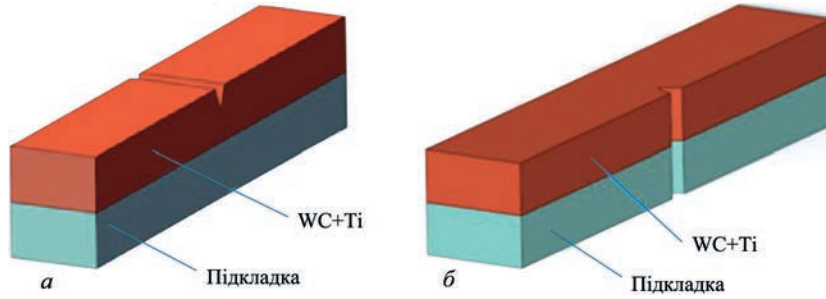


Рис. 3. Схематичні зображення варіантів випробувань на удару в'язкість зразків з наплавленнями: а – із застосуванням «фронтального удару»; б – із застосуванням «бокового удару»

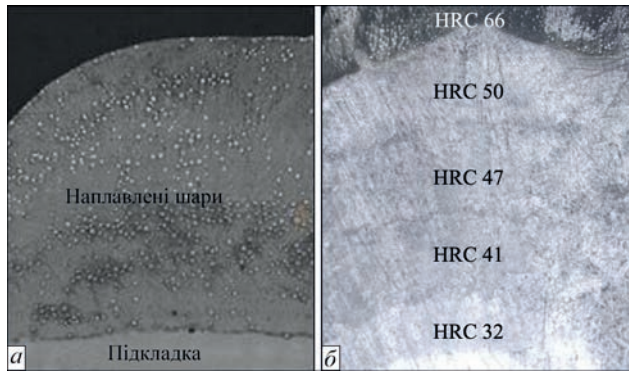


Рис. 4. Загальний вигляд зразків (а) і структура фрагменту зразка (б, ×10) типу «стінка» із функціонально-градієнтного матеріалу «Ti-6Al-4V + WC» зі змінним по висоті вмістом WC технологічних досліджень підтвердили можливість отримання об'ємних виробів із композиційних матеріалів «Ti-6Al-4V + WC» з регулюванням вмісту карбіду вольфраму (рис. 4, а).

Підтверджено, що розроблена технологія дозволяє отримувати об'ємний багатшаровий матеріал градієнтного типу та варіювати вміст карбіду вольфраму від 0 до 50 % і, відповідно, твердість по об'єму (висоті) від HRC 32 для нижніх (глибинних) шарів із титанового сплаву Ti-6Al-4V до HRC 56...66 і вище в напрямку до поверхневих шарів (рис. 4, б).

У матеріалі наплавлених шарів отриманих зразків пор та інших дефектів не виявлено. Лінії сплавлення наплавлених шарів однорідні (рис. 5, а). Лінія сплавлення з титановою підкладкою, на якій вирощували зразки типу «стінка», також однорідна (рис. 5, б). Для сферичних частинок WC з мікротвердістю $HV_{0,1} = 2172...3796$, які знаходяться в «матриці» із титанового сплаву Ti-6Al-4V, характерною є наявність металургійного зв'язку з матрицею при їх відносно рівномірному розподілі у матеріалі цієї матриці (рис. 5, в, з).

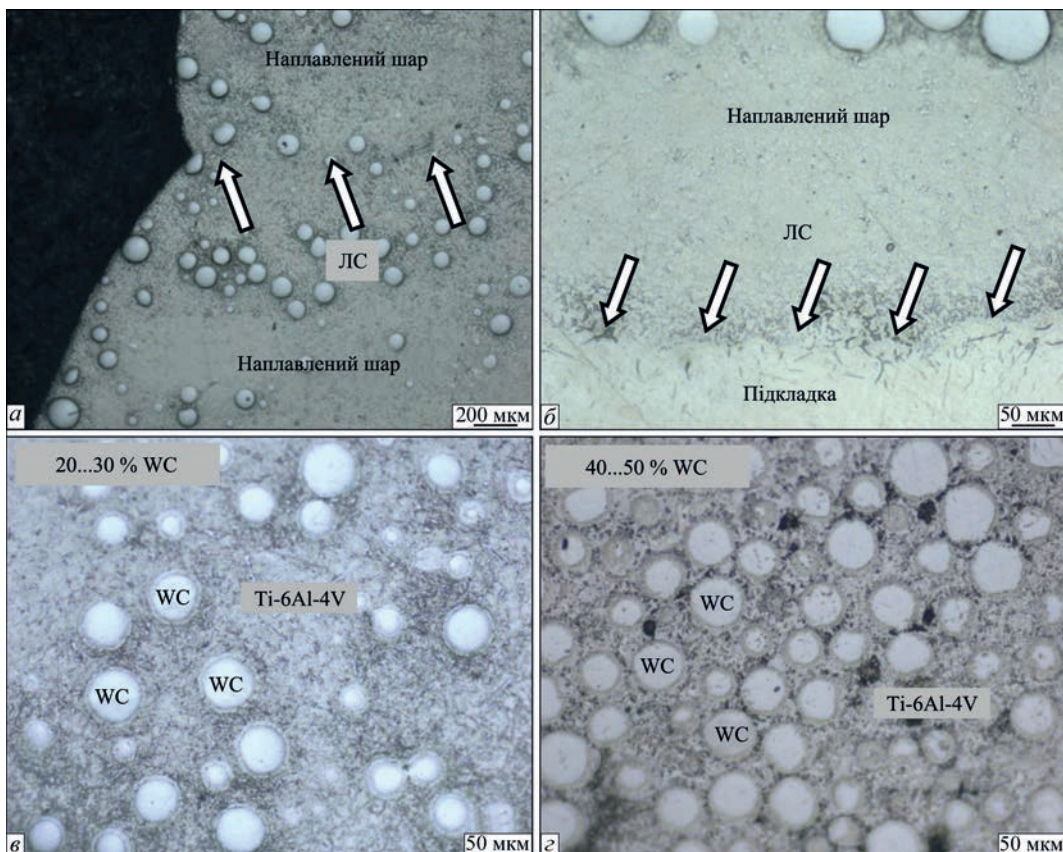


Рис. 5. Мікроструктура фрагментів наплавлених шарів зразка типу «стінка» із функціонально-градієнтного матеріалу «Ti-6Al-4V + WC»: а, б – лінії сплавлення (ЛС); в, з – наплавлені шари зі змінним по висоті вмістом WC (а ×50; б-з, ×200)

Шляхом вибору режимів плазмового напилення та погонної енергії можна змінювати твердість, мікроструктуру та мікротвердість матриці матеріалу наплавлених шарів, у тому числі ступінь розплавлення частинок сферичного порошку WC, а саме досягати їх часткового (рис. 6, а, б) або повного (рис. 6, в) розплавлення.

Так, наприклад, по границях частинка – WC/«матриця» у наплавлених шарах можна досягати часткового розплавлення карбідної фази (рис. 6, а, б). У даному випадку частинки WC вже втратили сферичну форму, навколо них спостерігається прошарок, збагачений вольфрамом і вуглецем, в якому формується нова структура зі складовою стехіометричного складу (W,Ti)C_x. Деякі частинки WC майже розплавившись, але їх первинні границі частинка – WC/«матриця» ще спостерігаються (рис. 6, а). Деякі частинки розчинилися повністю. Їх структура відповідає структурі розплавлених прошарків по границях частинка – WC/«матриця» у наплавлених шарах (рис. 6, в).

Для детальнішого аналізу фізико-механічних властивостей отриманих матеріалів досліджено декілька типів зразків, отриманих адитивним наплавленням із використанням порошку або дроту сплаву Ti-6Al-4V з додаванням порошку WC у процесі адитивного наплавлення (табл. 1).

Детальний аналіз хімічного складу матеріалу наплавлення підтвердив розчин порошку WC (табл. 2, рис. 7, а, локальний аналіз №№ 1–6) в «матриці» Ti-6Al-4V та вміст W до 55 % (табл. 2, рис. 7, а, б, фрагменти №№ 7, 8). Можна припустити, що в об'ємі «матриці» наплавлених шарів

спостерігається формування саме дисперсних частинок карбідних фаз (рис. 7, б).

Рентгеноструктурним фазовим аналізом матеріалу наплавлених шарів виявлено наявність наступних фаз: (α + β) – Ti; WC та WC + W₂C. Можна припустити, що утворення карбіду W₂C призводить до додаткового зміцнення матеріалу «матриці» наплавлення.

У результаті механічних випробувань на розрив встановлено, що максимальні значення σ_в = 641,8 МПа та σ_в = 666,8 МПа характерні для зразків № 6 та № 4 (місце розриву – наплавлений матеріал), відповідно із вмістом WC до 30 та 50 %, отриманих адитивним наплавленням із використанням присадного дроту Ti-6Al-4V з додаванням порошку WC (див. табл. 1). Такі показники міцності композиційних об'ємних зразків «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар + сплав Ti6Al4V Grade 5» відповідають 72...75 % границі міцності сплаву Ti6Al4V Grade 5 (лист відпалений), ідентичного за хімічним складом досліджуваному титановому сплаву, який виступає в якості матриці досліджуваного композиційного матеріалу [33–36]. У наплавлених шарах зразка № 4 об'ємна частка (V_v) частинок WC у нижньому шарі складає 50 %. Мікроструктура верхнього шару наплавлення однорідна з мікротвердістю HV = 706,0...1055,8. У верхній зоні другого шару наплавлення частинки WC присутні у невеликій кількості. Мікротвердість нижнього шару складає HV = 479,4...859,0. Таким чином, при переході від нижнього шару до верхнього HV зростає в середньому на 30 %. Мікроструктурі наплавленого матеріалу двошарового зразка № 6 характерна об'ємна

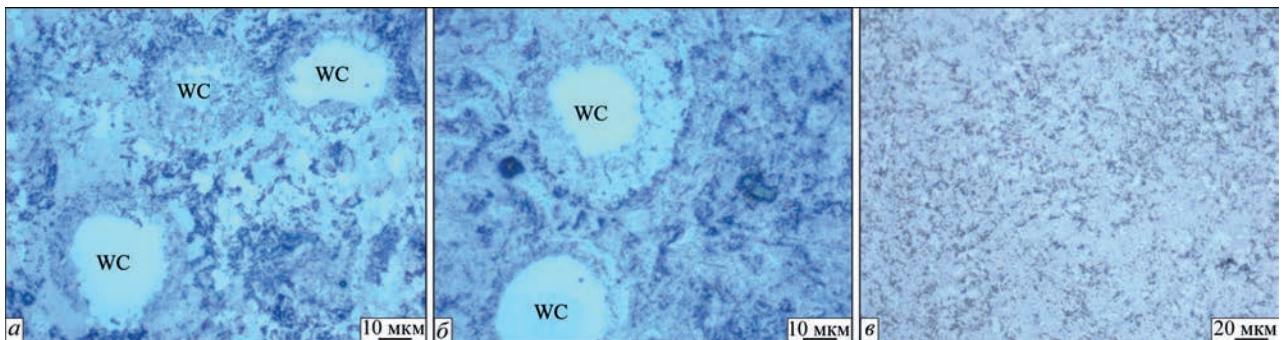


Рис. 6. Мікроструктура матеріалу наплавлень «Ti-6Al-4V + WC» (а, б, ×1000; в, ×500)

Таблиця 1. Механічні та структурні параметри наплавлених шарів

Номер	Тип наплавленого матеріалу	n	δ, мм	HRC	HV _{0,1}		V _v , %	σ _в , МПа
					Нижній шар	Верхній шар		
1	Порошки Ti-6Al-4V + WC	2	3,1	61	317,2...346,5	373,3...468,7	30	586,4
2		2	3,6	58	348,4...360,2	377,3...380,0	25	605,4
3	Дріт Ti-6Al-4V + порошок WC	6	15	53	410,7...550,5	465,2...1187,4	40	611,4
4		2	8	66	479,4...859,0	706,0...1055,8	50	666,8
5		1	3,4	54,6	321,4...473,0	-	30	584,5
6		2	6,7	55,2	346,2...408,9	400,6...541,9	30	641,8

Примітки. n – кількість наплавлених шарів; δ – загальна товщина наплавлення; HRC – максимальна твердість з поверхні наплавлення; HV – мікротвердість у поперечному перерізі; V_v – максимальний вміст частинок WC в матеріалі наплавлення; σ_в – міцність на розрив.

Таблиця 2. Результати елементного аналізу (мас. %) матеріалу наплавлення зразка № 6 (дріт Ti-6Al-4V + порошок WC)

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Ti	23,7...21,3	37,1...39,4	53,4...68,9	43,5...79,2	44,7...59,1	50,9...70,7	57,8...68,3	44,9...51,3
W	76,4...78,7	60,6...62,9	31,1...46,6	20,8...56,5	40,9...55,3	29,3...49,5	31,7...42,23	48,7...55,1

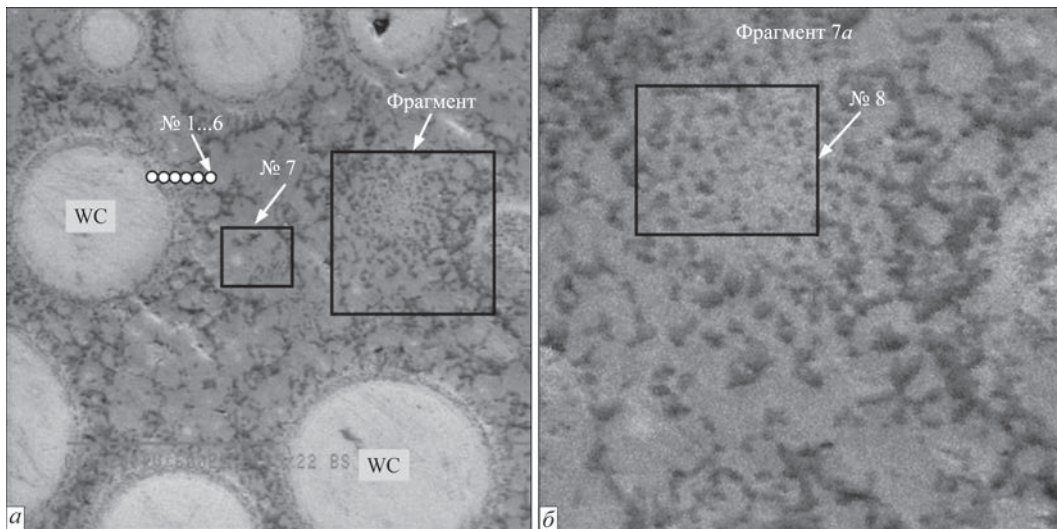


Рис. 7. Мікроструктура матеріалу наплавлення зразка № 6 (дріт Ti6Al4V + порошок WC), а×600; б – збільшення фрагменту рис. 7, а у 10 разів

частка частинок WC 30 % при рівномірному їх розподілі у першому та другому шарах та безградієнтному рівні мікротвердості (див. табл. 1).

У результаті випробувань на ударну в'язкість зразків з'єднань типу «стінка» з наплавленими шарами композиційного матеріалу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + порошок WC» встановлено наступне. Для досліджуваних зразків із вмістом частинок карбиду вольфраму у «матриці» матеріалу наплавлення з об'ємною часткою $V_v = 30\%$ цей показник складає 10,75...17,375 Дж/см². При цьому значення ударної в'язкості сплаву Ti6Al4V Grade 5, який використовували в якості підкладки для вирощування стінки з матеріалу «Ti-6Al-4V + WC», знаходиться в інтервалі 19,5...21 Дж/см². Таким чином, об'ємні зразки (заввишки 10 мм, з яких 5 мм – підкладка і

5 мм – наплавлений шар) із різних типів композиційного матеріалу «Ti-6Al-4V + WC», отриманого адитивним плазмовим наплавленням, характеризуються загальним рівнем ударної в'язкості, який може досягати до 70...80 % рівня цього показника листового титанового сплаву Ti6Al4V Grade 5.

Фрактографічними дослідженнями поверхні руйнування матеріалу наплавлення (дріт Ti6Al4V + порошок WC) встановлено наступне. Для нерозплавлених частинок WC характерним є крихке руйнування (рис. 8).

Характер руйнування матеріалу «матриці» наплавлення переважно змішаний квазікрихкий з розміром фасеток 3...8 мкм та в'язкою складовою з дисперсними ямками розміром 1...3 мкм. Такі структурні особливості характеру мікрорельєфу

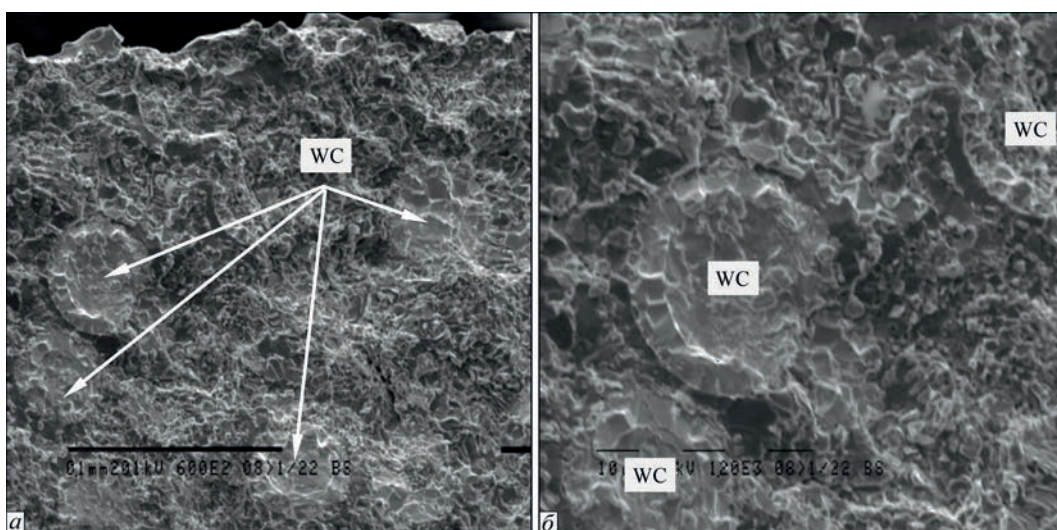


Рис. 8. Фрактограми поверхні руйнування матеріалу наплавлення зразка № 6 (дріт Ti6Al4V + порошок WC), а×600, б×1200

поверхні руйнування «матриці» наплавлення свідчать про високий комплекс властивостей міцності та в'язкості матеріалу наплавлень.

Висновки

1. Підтверджено, що технологія плазово-дугового адитивного наплавлення з одночасним подаванням у плазову дугу порошку або присаджувального дроту титанового сплаву Ti-6Al-4V та сферичного порошку WC дозволяє отримувати об'ємні зразки із функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів, в яких матрицею є титановий сплав з армуючою фазою WC. Технологія реалізує можливість змінювати по об'єму (висоті зразка) карбиду вольфраму від 0 до 50 об. %, відповідно змінювати твердість від HRC 32 для нижніх (глибинних) шарів і до HRC 56...66 і вище в напрямку до поверхневих шарів.

2. Отримані матеріали характеризуються бездефектною структурою, лінії сплавлення наплавлених шарів однорідні. Шляхом вибору режимів плазового наплення та погонної енергії можна змінювати твердість, мікроструктуру та мікротвердість матриці матеріалу наплавлених шарів, у тому числі ступінь розплавлення частинок сферичного порошку WC, а саме – зберігати їх сферичну форму із мікротвердістю $HV_{0,1} = 2172...3796$ або досягати їх часткового та повного розплавлення. У випадку збереження сферичної форми частинок WC, які знаходяться в матриці із титанового сплаву Ti-6Al-4V, характерною є наявність металургійного зв'язку їх з цією матрицею.

3. Встановлено, що границя міцності отриманих матеріалів при випробуваннях композиційних зразків типу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар + сплав Ti6Al4V Grade 5» для випадку адитивного наплавлення присаджувальним дротом Ti-6Al-4V з добавкою порошку WC до 50 об. %, досягає показника $\sigma_b = 641,8...666,8$ МПа (місце розриву – наплавлений матеріал). Це відповідає 72...75 % границі міцності ідентичного за хімічним складом сплаву Ti6Al4V Grade 5 (лист відпалений), що виступає в якості матриці наплавленого композиційного матеріалу. Значення ударної в'язкості зразків композиційного матеріалу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар» заввишки 10 мм, з яких 5 мм – підкладка і 5 мм – наплавлений шар, при об'ємній частці частинок WC 30 % у «матриці» матеріалу наплавлення досягає до 70...80 % рівня цього показника листового титанового сплаву Ti6Al4V Grade 5.

Список літератури/References

1. Zafar, F., Emadinia, O., Conceição, J. et al. (2023) A review on direct laser deposition of Inconel 625 and Inconel 625-based composites. *Challenges and Prospects. Metals.*, **13**, 787. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13040787>

2. Preis, J., Wang, Z., Howard, J. et al. (2024) Effect of laser power and deposition sequence on microstructure of GR-Cop42 – Inconel 625 joints fabricated using laser directed energy deposition. *Materials and Design*, **241**, 112944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112944>

3. Zhukov, V., Grigorenko, G., Shapovalov V. (2016) Additive manufacturing of metal components (Review). *The Paton Welding J.*, **5–6**, 137–142. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.24>

4. Su, G., Shi, Y., Li, G. et al. (2023) Improving the deposition efficiency and mechanical properties of additive manufactured Inconel 625 through hot wire laser metal deposition. *J. of Materials Processing Technology*, **322**, 118175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118175>

5. Danielewski, H., Radek, N., Orman, L. et al. (2023) Laser metal deposition of Inconel 625 alloy – comparison of powder and filler wire methods. *Materials Research Proceedings*, **34**, 154–160. DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644902691-19>

6. Gu, Y., Xu, Y., Shi, Y. et al. (2022) Corrosion resistance of 316 stainless steel in a simulated pressurized water reactor improved by laser cladding with chromium. *Surface and Coatings Technology*, **441**, 128534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128534>

7. Ahn, D. (2021) Directed energy deposition (DED) Process: State of the art. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, **8**, 703–742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>

8. Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B. et al. (2021) Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, **49**, 271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>

9. King, W., Anderson, A., Ferencz, R. et al. (2015) Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. *Applied Physics Reviews*, **2**, 041304. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4937809>

10. Hassila C., Paschalidou, M., Harlin, P. et al. (2022) Potential of nitrogen atomized alloy 625 in the powder bed fusion laser beam process. *Materials and Design*, **221**, 110928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110928>

11. Rehman, A., Karakas, B., Mahmood, M. et al. (2023) Additive manufacturing of Inconel-625: from powder production to bulk samples printing. *Rapid Prototyping J.*, **9(23)**, 1788–1799. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2022-0373>

12. Chen, G., Zhao S., Tan P. et al. (2018) A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder Technology*, **333**, 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013>

13. Yurtukan, E., Unal, R. (2022) Theoretical and experimental investigation of Ti alloy powder production using low-power plasma torches. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **32**, 175–191. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65786-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65786-2)

14. Prokopov, V., Fialko, N., Sherenkovskaya, G. et al. (1993) Effect of the coating porosity on the processes of heat transfer under, gas-thermal atomization. *Powder Metall. Met. Ceram.*, **32**, 118–121. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00560034>

15. Yin, Z., Yu, D., Zhang, Q. et al. (2021) Experimental and numerical analysis of a reverse-polarity plasma torch for plasma atomization. *Plasma Chem Plasma Process.*, **41**, 1471–1495. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>

16. Bobzin, K., Ernst, F., Richardt, K. et al. (2008) Thermal spraying of cylinder bores with the plasma transferred wire arc process. *Surface and Coatings Technology*, **202(18)**, 4438–4443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.023>

17. Fan, H., Kovacevic, R. (2004) A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 2531–2544. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/18/009>

18. Sun, P., Fang, Z., Zhang, Y., Xia, Y. (2017) Review of the methods for the production of spherical Ti and Ti alloy powder. *JOM*, **69**, 1853–1860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>

19. Korzyk, V., Khaskin, V., Grynyuk, A. et al. (2021) Comparing features in metallurgical interaction when applying different techniques of arc and plasma surfacing of steel wire on titanium. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **12(112)**, 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238634>

20. Korzyk, V.M., Grynyuk, A.A., Khaskin, V.Yu. et al. (2023) Plasma-arc technologies of additive surfacing (3D printing) of spatial metal products: application experience and new op-

- opportunities. *The Paton Welding J.*, **11**, 3–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.11.01>
21. Korzhik, V. (1992) Theoretical analysis of the conditions required for rendering metallic alloys amorphous during gas-thermal spraying. III. Transformations in the amorphous layer during the growth process of the coating. *Powder Metall. Met. Ceram.*, **31(11)**, 943–948. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00797621>
 22. Fialko, N., Prokopov, V., Meranova, N. et al. (1993) Thermal physics of gas thermal coatings formation processes. State of investigations. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, **4**, 83–93 [in Russian].
 23. Fialko, N., Prokopov, V., Meranova, N. et al. (1994) Temperature conditions of particle-substrate systems in a gas thermal deposition process. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, **2**, 59–67 [in Russian].
 24. Jing, H., Yu, Shi, Gang, Zh. et al. (2022) Minimizing defects and controlling the morphology of laser welded aluminum alloys using power modulation-based laser beam oscillation. *J. Manufacturing Processes*, **83**, 49–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.031>
 25. Fialko, N., Dinzhos, R., Sherenkovskii, J. (2021) Establishing patterns in the effect of temperature regime when manufacturing nanocomposites on their heat-conducting properties. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **4(5(112))**, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236915>
 26. Li, X., Cui, L., Shonkwiler, S. et al. (2023) Automatic characterization of spherical metal powders by microscope image analysis: a parallel computing approach. *J. Iron Steel Res.*, **30**, 2293–2300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00907-z>
 27. Appa Rao, G., Srinivas, M., Sarma, D. (2006) Effect of oxygen content of powder on microstructure and mechanical properties of hot isotatically pressed superalloy Inconel 718. *Materials Science and Engineering A*, **435(3)**, 84–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.053>
 28. Liu, Y., Zhang, S., Zhang, L. et al. (2024) Effects of oxygen content on microstructure and creep property of powder metallurgy superalloy. *Crystals*, **14(4)**, 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst14040358>
 29. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Kvasnytskyi, V. et al. (2020) Designing brazing filler metal for heat-resistant alloys based on Ni3Al intermetallic. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **6(12(108))**, 6–19. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217819>
 30. Skorokhod, A., Sviridova, I., Korzhik, V. (1994) Structural and mechanical properties of polyethylene terephthalate coatings as affected by mechanical pretreatment of powder in the course of preparation. *Mekhanika Kompozitnykh Materialov*, **30(4)**, 455–463 [in Russian].
 31. Gu, Y., Zhang, W., Xu, Y. et al. (2022) Stress-assisted corrosion behaviour of Hastelloy N in FLiNaK molten salt environment. *Npj Mater. Degrad.*, **6**, 90. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00300-x>
 32. Yongxian Huang (2024) Strength-ductility materials by engineering coherent interface at incoherent precipitates. *Materials Horizons*, **11(14)**, 3408–3419. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3436553/v1>
 33. Ren, X.P., Li, H.Q., Guo, H. et al. (2021) A comparative study on mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy processed by additive manufacturing vs. traditional processing. *Materials Science and Engineering: A*, **817**, 141384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141384>
 34. Mulay, R.P., Moore, J.A., Florando, J.N. et al. (2016) Microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V: mill-annealed versus direct metal laser melted alloys. *Materials Science and Engineering*, **666**, 43–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.012>
 35. Gargi Roya, Raj Narayan Hajraa, Woo Hyeok Kima et al. (2024) Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy through selective laser melting: comprehensive study on the effect of hot isostatic pressing (HIP). *J. of Powder Materials*, **31(1)**, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.4150/KPMI.2024.31.1.1>
 36. Gupta, R.K., Anil Kumar, V., Mathew, C., Sudarshan Rao, G. (2016) Strain hardening of titanium alloy Ti6Al4V sheets with prior heat treatment and cold working. *Materials Science and Engineering*, **662**, 537–550. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.094>

OBTAINING FUNCTIONALLY-GRADED METAL-MATRIX MATERIALS Ti–6Al–4V + WC BY THE METHOD OF ADDITIVE PLASMA-ARC DEPOSITION

V.M. Korzhyk¹, A.A. Grynyuk², O.A. Babych², O.M. Berdnikova¹, Ye.V. Illiashenko¹, O.I. Bushma¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: omberdnikova@gmail.com

²Scientific-Research Institute of Welding Technologies in Zhenjiang Province. 233 Yonghui Road, Xiaoshan District, Hangzhou City, Zhejiang Province, China

The possibility of 3D printing by additive plasma-arc surfacing of three-dimensional products from composite functionally-graded metal-matrix materials, in which the matrix is the titanium alloy Ti–6Al–4V and the reinforcing phase is tungsten carbide, has been experimentally confirmed. The technology of additive plasma-arc deposition with simultaneous feeding of powder or filler wire of titanium alloy Ti–6Al–4V Grade 5 and spherical WC powder into the plasma arc allows obtaining three-dimensional samples from functionally-graded metal-matrix materials of the «wall» type, in which the content of tungsten carbide along their height varies from 0 to 50 vol.% with a corresponding change in the hardness index from HRC 32 for the lower (deep) layers and up to HRC 56–66 and higher towards the surface layers. By selecting plasma spraying modes and energy input, it is possible to change the hardness, microstructure, and microhardness of the matrix of the material of the deposited layers, including the degree of melting of spherical WC powder particles, namely, to preserve their spherical shape with a microhardness of $HV0.1 = 2172\text{--}3796$ or to achieve their partial and complete melting. In the case of preserving the spherical shape of WC particles in a matrix of titanium alloy Ti–6Al–4V, the presence of a metallurgical bond between them and this matrix is characteristic. It has been established that the tensile strength of the obtained materials for the case of additive deposition with Ti–6Al–4V filler wire with the addition of WC powder up to 50 vol.% reaches $\sigma_t = 666.8$ MPa, which corresponds to 75 % of the tensile strength of the Ti–6Al–4VBT6 Grade 5 alloy of identical chemical composition (annealed sheet), which acts as the matrix of the studied composite material. The impact strength of the samples of wall-type joints with welded layers of the composite material Ti–6Al–4V Grade 5 alloy + WC powder reaches up to 70–80 % of the level of this parameter of the Ti–6Al–4V Grade 5 titanium alloy sheet. 36 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: 3D printing, additive plasma-arc deposition, titanium alloys, tungsten carbide, functionally-graded materials, structure, mechanical properties

Отримано 12.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 27.08.2025

Прийнято 30.09.2025

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ДІЛЯНОК ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ, ЩО НАГРІВАЛИСЯ ДО ТЕМПЕРАТУР ВІД 350 ДО 800 °С

В.Д. Позняков, О.В. Корєнєв

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

Під час зварювання в зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань середньовуглецевих легованих сталей утворюються дві характерні ділянки із загартованим (розташована на ділянках перегріву, нормалізації та часткової рекристалізації ЗТВ – високотемпературна ділянка) і відпущеним (розташована переважно на ділянках перекристалізації та синьоламкості ЗТВ – низькотемпературна ділянка) металом. У зварних з'єднаннях, виконаних з використанням ручного дугового та механізованого в захисних газах зварювання дротами малого діаметра, ширина цих ділянок може досягати 2,5 і 8,0 мм відповідно. У технічній літературі добре висвітлено вплив на механічні властивості металу термічних циклів, характерних для високотемпературної ділянки ЗТВ. Значно менше інформації є щодо впливу термічних циклів зварювання на механічні властивості низькотемпературної ділянки ЗТВ. У даній роботі наведено дані щодо протікання процесу нагріву та охолодження металу ЗТВ стикових зварних з'єднань завтовшки 12 мм, що нагрівалися до температур 780, 550 і 350 °С, та стосовно впливу такого нагріву на механічні властивості (твердість, міцність, пластичність, ударна в'язкість) із середньовуглецевих легованих сталей з різним вмістом легуючих елементів. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: середньовуглецеві леговані сталі, механічні властивості, термічні цикли, легуючі елементи

Вступ. Середньовуглецеві леговані термічно зміцнені сталі високої твердості ($HB > 5000$ МПа) і міцності ($\sigma_b > 1400$ МПа) можуть використовуватися як для виготовлення виробів військового призначення, що зазнають значних ударних впливів, так і для створення особливо навантажених вузлів і механізмів машин цивільного призначення, таких як ковші кар'єрних екскаваторів, кузови великовантажних автомобілів тощо. Необхідний комплекс механічних властивостей, високу твердість, міцність та ударну в'язкість зазначені сталі набувають за рахунок легування марганцем, кремнієм, хромом, молібденом, нікелем, мікролегування бором, титаном, алюмінієм, ванадієм тощо, а також у результаті термічного оброблення, яке полягає у гартуванні та низькотемпературному (при температурі не вище ніж 250 °С) відпуску сталі [1–6].

Більшість виробів, при виготовленні яких використовуються термозміцнені середньовуглецеві леговані сталі високої твердості, є зварними. Зазвичай для зварювання таких виробів використовують дугові процеси. Вони передбачають локальний нагрів сталевого прокату до температур, що перевищують температуру відпуску сталі, а в пришовній зоні наближаються до температури його плавлення. Умовно зону термічного впливу зварних з'єднань можна розбити на дві ділянки: високо- та низькотемпературну. До високотемпературної ділянки ЗТВ відносяться ділянка перегріву (температура коливається в межах 1100...1500 °С), ділянка нормалізації (температура коливається в межах 930...1100 °С) та частково неповної перекристалізації (температура коливається в межах 720...930 °С). На цій ділянці

зварного з'єднання при нагріванні метал перетворюється на аустеніт, а при охолодженні, у залежності від хімічного складу та ступеня переохолодження металу, в ньому відбуваються фазово-структурні перетворення з утворенням фериту–бейніту–мартенситу або змішаних структур. До низькотемпературної ділянки ЗТВ зварних з'єднань відносяться ділянки рекристалізації (температура коливається в межах 450...720 °С) та синьоламкості (температура коливається в межах 200...450 °С). Розміри та відстань від осі шва ділянок, що нагріваються до вказаних температур у зварному з'єднанні, залежать від багатьох факторів. Основними з них є: режим зварювання, товщина металу й тип з'єднання. Для характерних для ручного, штучними електродами та механізованого в захисних газах процесів зварювання ширина високотемпературної ділянки ЗТВ може досягати 2,5 мм, а низькотемпературної – 8,0 мм.

Наразі в технічній літературі достатньо добре висвітлені питання щодо впливу режимів зварювання та умов охолодження зварних з'єднань на структурні перетворення, які відбуваються в металі ділянки перегріву ЗТВ [4–8]. Меншою мірою, але також добре, представлені в наукових публікаціях дані стосовно зазначених факторів на механічні властивості металу [9–12]. Щодо низькотемпературних ділянок ЗТВ, в яких метал нагрівається до температур, більших за температуру A_{c1} , то кількість такої інформації носить обмежений характер і стосується переважно показників твердості металу.

Мета даної роботи полягала в тому, щоб, визначивши координати ділянки відпуску ЗТВ, оцінити

В.Д. Позняков – <https://orcid.org/0000-0001-8561-3526>, О.В. Корєнєв – <https://orcid.org/0009-0007-3533-1247>

© В.Д. Позняков, О.В. Корєнєв, 2025

Таблиця 1. Хімічний склад середньовуглецевих легованих сталей, що досліджувалися

Маркування сталі	Масова частка елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	B
«1»	0,23	0,25	0,82	0,50	0,90	0,30	0,030	0,004	0,016	0,003
«2»	0,31	0,16	0,74	1,66	2,26	0,30	0,202	0,010	0,016	–
«3»	0,21	0,45	0,92	0,58	0,38	0,20	0,010	0,005	0,023	0,004

перебіг в ній термічних процесів зварювання (нагрів–охолодження металу в залежності від режимів зварювання), відтворити ці процеси на модельних зразках і встановити, як зазначені зміни впливають на механічні властивості відпущеного металу.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили з використанням декількох середньовуглецевих легованих сталей з границею текучості понад 1200 МПа, які відрізняються між собою за хімічним складом (див. табл. 1).

Зварювання стикових з’єднань завтовшки 12 мм виконували механізованим способом у середовищі захисного газу (82 % Ar + 18 % CO₂) дротом діаметром 1,2 мм марки ХОРДА 307 Ті (система легування 08Х20Н9Г7Т) з використанням наступного режиму: сила зварювального струму $I_{зв} = 160...180$ А; напруга на дузі $U_d = 23...25$ В; швидкість зварювання $V_{зв} = 10...12$ м/год.

Розташування ділянки відпуску визначали на підставі вимірювань мікротвердості металу в ЗТВ зварних з’єднань. Крок вимірювань становив 1 мм.

Ударну в’язкість металу ділянки відпуску оцінювали за результатами випробувань на ударний згин стандартних зразків розміром 10×10×55 мм з круглим надрізом типу Менаже, виготовлених зі зварних з’єднань. Випробування зразків виконували за температури 20 °С.

Запис термічного циклу зварювання проводили стосовно трьох ділянок зони відпуску зварних з’єднань, а саме ділянок, які нагрівалися до температур 780, 550 і 350 °С. Для цього використовували термопару «хромель–алюмель» діаметром 0,5 мм.

Показники міцності ($\sigma_{0,2}$ і σ_B) та пластичності (δ_5 і ψ) визначали за результатами випробувань на розтяг стандартних зразків, які виготовлялися з оброблених у відповідності до характерних для зони відпуску металу ЗТВ з’єднань термічних циклів, зварювання яких виконувалося на наведених вище режимах. Нагрів модельних зразків розмірами 12×12×120 мм виконували на устаткуванні МРС-75 струмом, що проходить через зразок за заданою програмою [13]. Швидкість охолодження зразків регулювали за рахунок їх обдуву повітрям з різною інтенсивністю.

Результати досліджень та обговорення. Заміри мікротвердості металу швів, ЗТВ та сталевого прокату (рис. 1) показали, що твердість металу швів в усіх випадках майже однакова та знаходиться в межах $HB\ 230...260$. Це закономірно, оскільки для зварювання використовувався один і той

же дріт та режими зварювання. Що стосується мікротвердості металу на ділянках ЗТВ і сталі, що розташовані на різних відстанях від шва, то ці показники залежать від хімічного складу сталі. Найвищі показники твердості (приблизно $HB\ 530$) характерні для загартованої ділянки перегріву ЗТВ (розташована на відстані 1 мм від лінії сплавлення зварних з’єднань сталей «2» і «3»). Дещо нижчі показники твердості ($HB\ 450$) має метал на ділянці перегріву ЗТВ зварних з’єднань сталі «1». Твердість ділянки відпуску (розташована в інтервалі 4...9 мм), як і основного металу (розташований в інтервалі 10...13 мм) також найнижча у з’єднань сталі «1». Найвищі, майже на рівні твердості основного металу, показники HB характерні для ділянки відпуску зварних з’єднань сталі «2».

Таким чином, за результатами цих досліджень було встановлено, що в залежності від хімічного складу сталей висока твердість металу, яку він набуває за рахунок термічного оброблення сталі, може зменшуватися в результаті нагріву за термічним циклом зварювання. Чим менша концентрація легуючих елементів у сталі, тим нижчі показники твердості металу на ділянці відпуску ЗТВ.

Дані щодо умов нагріву та охолодження окремих ділянок відпуску металу ЗТВ наведені на рис. 2. Розглянуто три відпущені ділянки, які внаслідок дії на метал тепла від горіння зварювальної дуги нагрівалися до температур 780, 550 і 350 °С. Для цього термопари монтувалися на відстані 4, 6 і 9 мм від лінії сплавлення. Аналіз отриманих результатів показав, що інтенсивність зменшення температури металу на початковій стадії його охолодження суттєво різниться між собою. Чим вища температура нагріву, тим більша швидкість охолодження. В інтервалі тем-

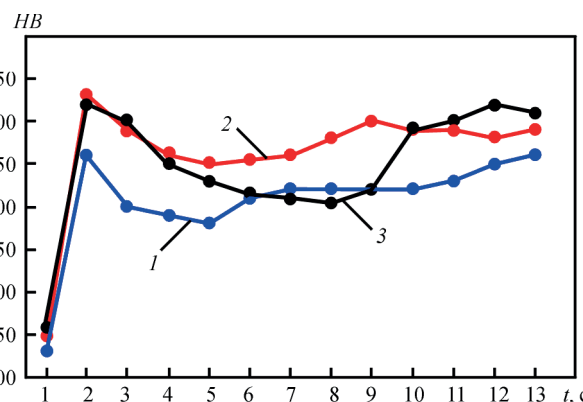


Рис. 1. Показники мікротвердості металу швів, ЗТВ та основного металу стикових зварних з’єднань завтовшки 12 мм сталей: «1» – 1; «2» – 2; «3» – 3

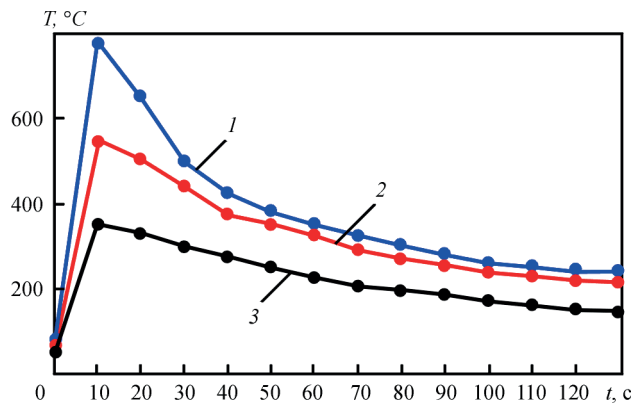


Рис. 2. Термічні цикли зварювання ділянок відпустки ЗТВ стикових зварних з'єднань завтовшки 12 мм, що нагрівалися до температур, °С: 780 – 1; 550 – 2; 350 – 3

ператур 400...300 °С інтенсивність охолодження металу на всіх відпущених ділянках ЗТВ вирівнюється.

Наведені на рис. 2 дані в подальшому були використані при моделюванні термічних циклів зварювання під час оброблення за цими циклами вищезазначених зразків.

Результати випробувань зразків на розтяг (виготовлялися з термічно оброблених модельних зразків) на ударний згин (виготовлялися зі зварних з'єднань) наведені в табл. 2.

Як свідчать наведені в табл. 2 дані, показники міцності ($\sigma_{0,2}$ і σ_b) металу ЗТВ, який нагрівався до температур від 350 до 780 °С, в усіх випадках зменшуються по відношенню до вихідної міцності сталі. Ступінь цих змін залежить від хімічного складу сталі та від температури, до якої метал ЗТВ нагрівався під час зварювання. Чим нижча концентрація легуючих елементів і бору в сталі або вища температура нагріву, тим суттєвіше зменшується міцність металу. Так, $\sigma_{0,2}$ і σ_b металу ЗТВ, який в процесі зварювання нагрівався до температури 780 °С, для зварних з'єднань сталі «1» зменшується по відношенню до основного металу майже на

40 %, а для сталей «2» і «3» – на 20...25 %, що удвічі менше. Найменші зміни показників міцності спостерігаються в металі, який під час зварювання нагрівався до температури 350 °С – зменшується приблизно на 10 % у зварних з'єднаннях сталі «1» і «3» та залишаються майже без змін у з'єднаннях сталі «2».

Що стосується пластичних властивостей (δ_5 і φ) металу, то на відміну від показників міцності, вони у зварних з'єднаннях сталей «1» і «3» незалежно від температури, до якої нагрівався метал, зростають на 30...50 % і майже не змінюються у з'єднаннях сталі «2».

Щодо показників ударної в'язкості, то ці показники металу суттєво залежать як від температури, до якої метал нагрівався під час зварювання, так і від температур, при яких відбувалося випробування зразків. Найсуттєвіші зміни показників *KCU* спостерігаються в металі, який випробовувався при температурі 20 °С. У зразках, в яких надріз виконувався на ділянках, де метал нагрівався до температур 550 та 780 °С, показники ударної в'язкості зросли в 1,3...2,2 рази. Найвищі значення характерні для зразків, виготовлених зі зварних з'єднань сталі «1» з надрізом, розташованим у зоні, де метал нагрівався до температури 780 °С. Що стосується результатів випробування зразків, в яких надріз виконувався по металу, що в процесі зварювання нагрівався до температури 350 °С, то їх ударна в'язкість виявилася нижчою по відношенню до основного металу. Як зазначалося вище, дана температура відноситься до температурного діапазону, в якому відбувається синьоламкість металу з характерним для цього явища зменшенням показників його ударної в'язкості. Слід зазначити, що зменшення *KCU* характерне як для зразків, які випробовувалися при температурі 20 °С, так і для тих, які випробовувалися при температурі –40 °С.

Таблиця 2. Механічні властивості середньовуглецевих легуваних сталей, які досліджувалися, та металу ділянок ЗТВ, що нагрівалися до температур 780, 550 і 350 °С

Маркування сталі	Температура нагріву, °С	HB	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	φ	<i>KCU</i> , Дж/см ²	
			МПа		%		+20 °С	–40 °С
«1»	0	450	1447	1690	11,0	47,2	93	85
	350	420	1294	1497	21,0	63,0	89	76
	550	380	937	1044	20,0	69,1	176	173
	780	400	892	981	23,2	68,5	208	183
«2»	0	490	1475	1835	14,1	46,1	61	59
	350	500	1409	1773	13,6	45,4	50	37
	550	450	1378	1620	13,9	46,4	85	57
	780	490	1210	1463	14,8	47,0	98	62
«3»	0	520	1542	1844	11,5	44,3	52	51
	350	500	1402	1594	14,6	61,3	36	32
	550	430	1389	1520	14,9	60,0	74	52
	780	420	1242	1383	15,0	57,2	83	55

Висновки

Результати досліджень щодо впливу термічних циклів зварювання на механічні властивості металу низькотемпературних ділянок ЗТВ зварних з'єднань різних за хімічним складом середньовуглецевих легованих сталей високої твердості (HB 500) показали наступне:

1. Висока твердість металу, яку він набуває за рахунок термічного оброблення сталі в процесі виготовлення прокату, може зменшуватися в результаті нагріву металу за характерними для низькотемпературних ділянок ЗТВ термічними циклами. Чим менша концентрація легуючих і мікролегуючих елементів у сталі, тим нижчі показники твердості металу на ділянці відпуску ЗТВ.

2. Міцність металу ділянок ЗТВ зварних з'єднань термозміцнених середньовуглецевих легованих сталей, що нагрівався до температур 350...780 °С, зменшується, а пластичність збільшується по відношенню до основного металу.

3. Ударна в'язкість металу ділянок ЗТВ зварних з'єднань термозміцнених середньовуглецевих легованих сталей, що нагрівався до температур 550...780 °С, по відношенню до основного металу зростає, а в разі нагріву до температури 350 °С – зменшується. Останнє пов'язано з тим, що температура 350 °С, входить у діапазон температур сеньольамкості сталей, які досліджувалися.

Список літератури/References

1. Tekin Özdemir (2020) Mechanical and microstructural analysis of armor steel welded joints. *Intern. J. of Engineering Research and Development UMAGD*, 12(1), 166–175. DOI: <https://doi.org/10.29137/umagd.488104>
2. Konat, Ł., Białobrzaska, B., Białek, P. (2017) Effect of welding process on microstructural and mechanical characteristics of Hardox 600 steel. *Metals*, 7(9), 349. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/met7090349>
3. Gaivoronskyi, O.A., Poznyakov, V.D., Zavdoveyev, A.V., Klapatyuk, A.V., Denisenko, A.M. (2023) Prevention of cold cracking in armour steel welding. *The Paton Welding J.*, 5, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.01>
4. Oskwarek, M. (2006) Structural features and susceptibility to cracking of welded joints of Hardox 400 and Hardox 500 steels.

- In: *Proc. of the IV Students' Science Conf.: Human-Civilisation-Future, Wrocław, Poland, 22–24 May 2006*, Vol. 2, 115–120.
5. Cabrilo, A., Geric, K. (2016) Weldability of high hardness armor steel. *Advanced Materials Research*, 1138, 79–84. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1138.79>
 6. Kuzmnikova, L. (2013) *An investigation of the weldability of high hardness armor steel*. Faculty of Engineering, University of Wollongong. <http://ro.uow.edu.au/theses/3853>
 7. Shchudro, A., Laukhin, D., Pozniakov, V. (2020) Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels. *Key Engineering Materials*, 844, 146–154. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.844.146>
 8. Максимов С.Ю., Прилипко О.О., Берднікова О.М., Алексєнко Т.О., Половецький С.В., Ю.А. Шепелюк (2021) Контроль параметрів металевої кристалічної решітки зварних з'єднань, виконаних під водою. *Металлофізика та новітні технології*, 43(5), 713–723. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.05.0713>
 9. Максимов, С.Ю., Прилипко, О.О., Берднікова, О.М., Алексєнко, Т.О. et al. (2021) Controlling the parameters of the metal crystal lattice of the welded joints made underwater. *Металлофізика та Новітні Технології*, 43(5), 713–723 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.05.0713>
 9. Позняков В.Д., Гайворонский А.А., Костин В.А., Дураченко В.В., Костин Ю.Н. (2017) Особенности превращения аустенита и механические свойства металла в зоне термического влияния соединений стали марки 71 при дуговой сварке. *Механіка та машинобудування*, 1, 254–260.
 9. Poznyakov, V.D., Gajvoronskij, A.A., Kostin, V.A., Durachenko, V.V., Kostin, Yu.N. (2017) Features of austenite transformation and mechanical metal properties in the area of thermal influence of joints of 71 grade steel in arc welding. *Механіка та Машинобудування*, 1, 254–260 [in Russian].
 10. Zavdoveev, A., Poznyakov, V., Baudin, T., Rogante, M. et al. (2021) Effect of nutritional values on the processing properties and microstructure of HSLA rod processed by different technologies. *Materials Today Communications*, 2, 102598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102598>
 11. Konat, Ł., Białobrzaska, B., Białek, P. (2017) Effect of welding process on microstructural and mechanical characteristics of Hardox 600 steel. *Metals*, 7(9), 349. DOI: <https://doi.org/10.3390/met7090349>
 12. Özdemir, T. (2020) Mechanical and microstructural analysis of armor steel welded joints. *Intern. J. of Engineering Research and Development*, 12(1), 166–175. DOI: <https://doi.org/10.29137/umagd.488104>
 13. Саржевский В.А., Сазонов В.Я. (1981) Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75. *Автоматическая сварка*, 5, 69–70.
 13. Sarzhevsky, V.A., Sazonov, V.Ya. (1981) Installation for simulating thermal cycles of welding based on the MCS-75 machine. *Автоматическая Сварка*, 5, 69–70 [in Russian].

MECHANICAL PROPERTIES OF METAL IN AREAS OF WELDED JOINTS OF MEDIUM-CARBON ALLOY STEELS HEATED TO TEMPERATURES FROM 350 TO 800 °C

V.D. Poznyakov, O.V. Korieniev

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: korenew@ukr.net

During welding, two characteristic areas are formed in the heat-affected zone (HAZ) of welded joints of medium-carbon alloy steels with hardened (located in the HAZ areas of overheating, normalization and partial recrystallization – high-temperature area) and tempered (located mainly in the HAZ areas of recrystallization and blue brittleness – low-temperature area) metal. In welded joints made using manual arc and mechanized gas-shielded welding with small-diameter wires, the width of these areas can reach 2.5 and 8 mm, respectively. The technical literature is well-illustrated with regard to the influence of thermal cycles, characteristic for the high-temperature area of the HAZ, on the mechanical properties of the metal. There is much less information on the influence of thermal cycles of welding on the mechanical properties of the low-temperature area of the HAZ. This paper presents the data on the course of the heating and cooling process of the HAZ metal of butt welded joints 12 mm thick, which were heated to temperatures of 780, 550 and 350 °C, and on the effect of such heating on the mechanical properties (hardness, strength, ductility, impact toughness) of medium-carbon alloy steels with different content of alloying elements. 13 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.

Keywords: medium-carbon alloy steels, mechanical properties, thermal cycles, alloying elements

Отримано 02.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 01.10.2025

Прийнято 13.10.2025

ВІДНОВЛЕННЯ ДЗВОНІВ І ХУДОЖНІХ ЛИВАРНИХ ВИРОБІВ ІЗ МІДНИХ СПЛАВІВ

Т.Б. Майданчук, А.М. Бондаренко, В.М. Ілюшенко, Є.П. Лук'янченко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: pwi_37@ukr.net

Представлено результати експериментальних робіт з відновлення художніх ливарних виробів із мідних сплавів. Показано, що при ремонті потрібен індивідуальний підхід, що пов'язано із різним хімічним складом і присутністю дефектів у литому металі, формою та розміром виробу, необхідністю корегування хімічного складу зварювальних матеріалів та ін. Визначено, що при реставрації дзвонів найдоцільнішим для виконання ремонтних робіт є процес ручного аргонодугового зварювання неплавким електродом (TIG-процес). Показано, що позитивні результати зі зварювання тріщин церковних дзвонів із забезпеченням їх високих акустичних властивостей досягається при правильному виборі присаджувального матеріалу. Для зварювання ливарних дефектів, а також виготовлення зварних вузлів скульптур може бути рекомендовано зварювання покритими електродами. Бібліогр. 19, табл. 3, рис. 13.

Ключові слова: ливарні бронзи, хімічний склад, дзвонова бронза, тріщини, ремонтно-зварювальні технології, металопорошковий дріт, покриті електроди

Вступ. Мідь та її сплави завдяки особливим фізико-механічним і технологічним властивостям знаходять широке застосування в різних галузях промисловості та будівництва. Немає жодної галузі виробництва, де б не використовувалась мідь і її низько- та складнолеговані сплави. Високі ливарні та декоративні властивості мідних сплавів роблять їх незамінними протягом багатьох віків (починаючи з «бронзової ери») при виготовленні художніх та ювелірних виробів – скульптур, пам'ятників, прикрас та ін.

Найпоширенішим сплавом для цих цілей є олов'яна бронза системи Cu–Sn–Zn–Pb, яка в якості ливарного матеріалу має високу рідкоплинність, невелику усадку, добре заповнює навіть складні ливарні форми, забезпечує «бронзовий колір» виробів та їх високу корозійну стійкість. Діаграму стану системи мідь–олово наведено на рис. 1 [1, 2].

Характерною особливістю структури олов'яних бронз є те, що в умовах твердіння звужується область твердого α -розчину, та евтектоїд ($\alpha + \beta$) (його основу складає електронне з'єднання $Cu_{31}Sn_8$ з масовим вмістом 32,53 % Sn) з'являється при концентраціях Sn значно менших, ніж це впливає з рівноважної діаграми стану [2]. Це відбувається внаслідок низької швидкості дифузії олова в мідь, коли при швидкому переході олов'яних бронз із рідкого в рідко-твердий та твердий стан атоми олова не встигають зайняти всі вузли в атомній решітці центрів і кристалів сплаву, що утворюється. У результаті кристали твердого α -розчину вміщують значно менше олова, ніж це впливає з рівноваж-

ної діаграми. Причому розплавлений сплав, що не закристалізувався, збагачується оловом у тих частинах зливка, які кристалізуються в останню чергу [3, 4]. З підвищенням вмісту олова значно підвищуються міцність і знижується пластичність сплаву (рис. 2) [5].

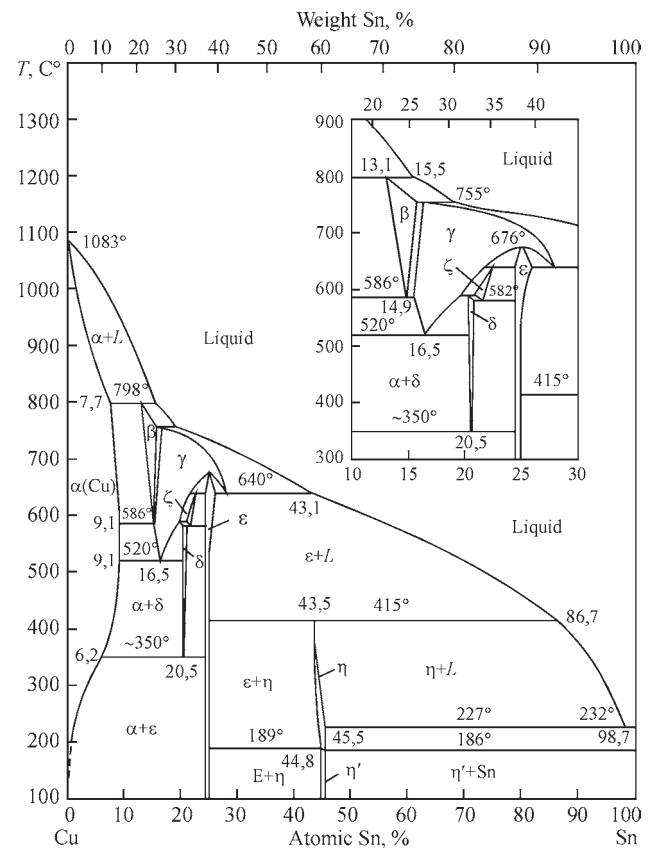


Рис. 1. Діаграма стану системи Cu–Sn [1, 2]

Майданчук Т.Б. – <https://orcid.org/0000-0002-2826-8514>, Бондаренко А.М. – <https://orcid.org/0000-0003-0506-4444>, Ілюшенко В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-9047-8512>, Лук'янченко Є.П. – <https://orcid.org/0000-0001-7678-5965>

© Т.Б. Майданчук, А.М. Бондаренко, В.М. Ілюшенко, Є.П. Лук'янченко, 2025

Хімічний склад ливарних бронз для художнього литва наведено в табл. 1 [6, 7].

Згідно з діючими стандартами до сплавів даної системи відносяться також ливарні бронзи марок БрОЗЦ12С5, БрО4Ц7С5, БрО4Ц4С17, БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3. Ці бронзи найбільш досліджені й, на наш погляд, також можуть використовуватись в якості матеріалу для художнього литва (у тих чи інших композиціях).

Наведені бронзи марок БХ і БрОЦС відносяться до малоолов'яних ($\leq 5...6\%$ Sn) бронз, при більшій концентрації Sn – високоолов'яні (БрО8Ц4, БрО10Ф1, БрО10Ц2, БрО10Ц10). Олово підвищує механічні властивості (рис. 2) та корозійну стійкість бронз. До високоолов'яних відноситься також добре відома з давніх часів «дзвонова» бронза, оптимальний склад якої – $20...23\%$ Sn, до 2% домішок, решта – Cu [8]. Саме такий склад бронзи забезпечує її достатню міцність і задовільні звукові якості, що особливо важливо при виготовленні таких виробів як церковні дзвони.

Для художнього литва, як правило, використовуються малоолов'яні бронзи з добавками цинку та свинцю, які поліпшують ливарні властивості сплаву та полегшують подальшу механічну обробку виробів. Добре придатним матеріалом для виготовлення художніх виробів (скульптур малих

форм, сувенірів, прикрас та ін.) слугують й інші сплави на основі міді, дешевші в порівнянні з олов'яними бронзами, – мідно-цинкові сплави (латуні), міно-алюмінієві сплави (алюмінієві бронзи), кремнієво-марганцеві бронзи.

Наведена інформація стосовно сплавів для художнього литва необхідна перш за все для чіткого розуміння, з яким металом ми маємо справу у випадку відновлювального ремонту виробу. Необхідність виконання таких ремонтних робіт виникає як у випадку підвищення ресурсу використання виробу, так і навіть на стадії виготовлення (зварювання дефектів литва). Практичний досвід зварювання ливарних бронз показує, що такі сплави відносяться до категорії матеріалів з обмеженою зварюваністю, їх зварювання – складна та відповідальна операція.

Мета даної роботи – визначення хімічного складу та структурних особливостей пошкоджених художніх виробів із мідних сплавів і розробка на їх основі спеціальних зварювальних матеріалів і технології зварювання для відновлення цілісності виробів.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, починаючи з 50-х років минулого сторіччя, ведуться систематичні дослідження зі зварюваності мідних сплавів і розробки технологічних процесів їх зварювання та наплавлення. Як правило, ці роботи виконувались з метою вирішення актуальних проблем застосування цих матеріалів у таких галузях як машинобудування, суднобудування, металургійна та електротехнічна промисловість.

Враховуючи існуючі доробки щодо зварювальних матеріалів (порошкові дроти, покриті електроди) і технологічних процесів зварювання та наплавлення конструкційних мідних сплавів, у відділі загальних проблем техніки та технології дугового зварювання ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України були проведені науково-практичні роботи стосовно відновлення та реставрації художніх ливарних виробів із мідних сплавів. Результати деяких із них наведено далі.

Реставрація церковних дзвонів. Церковні дзвони, які доводилось реставрувати, мали характерну класичну форму (рис. 3).

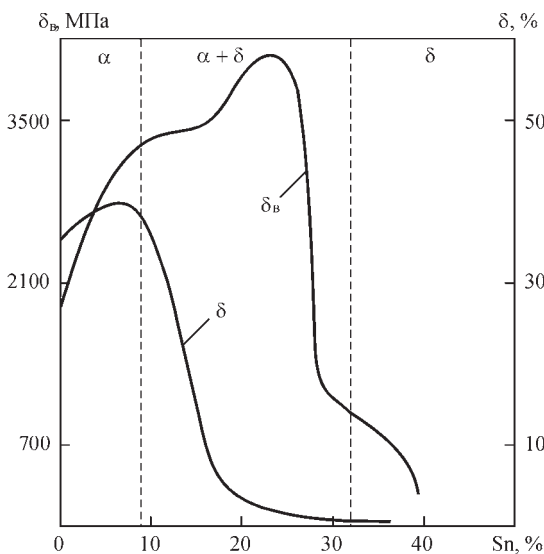


Рис. 2. Залежність механічних властивостей олов'яних бронз від вмісту олова

Таблиця 1. Склад ливарних бронз для художнього литва [6, 7]

Марка бронзи	Sn	Zn	Pb	Cu	Домішки				Застосування
					Sb	Fe	Al	Всього	
БХ1	4...7	5...8	1...4	зал.	1,0	1,0	0,1	3,0	Для відливки бюстів і статуй
БХ2	1...5	8...13	1...6	зал.	1,0	1,0	0,1	3,0	Габаритне декоративне литво
БХ3	0,5...3	25...35	1...3	зал.	0,5	1,0	0,5	3,0	Дрібне декоративне литво
Дзвонова бронза	20...23	*	*	зал.	*	*	*	*	Литво дзвонів

Примітки. БХ1 – для виготовлення бюстів, скульптур; БХ2 – для великого декоративного литва; БХ3 – для дрібного декоративного литва; * не регламентуються (але не більше 2 %).

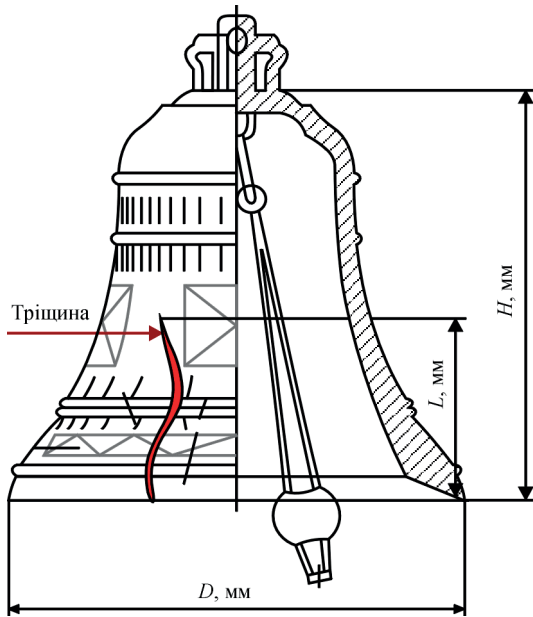


Рис. 3. Узагальнений профіль дзвонів, що підлягали реставрації [8]

Як зазначається в [9], основними критеріями якості церковних дзвонів є їх милозвучність і художнє оформлення, а також відсутність дефектів (пор, тріщин, неметалевих включень), які можуть призвести до його швидкого руйнування. Детальне дослідження дзвонової бронзи показало, що саме сплав міді з 20...22,5 % олова (вміст домішок в межах 1...2 %) має у литому нетермообробленому стані високі акустичні характеристики. Слід враховувати, що навіть незначна зміна хімічного складу призводить до суттєвих змін у структурі та властивостях дзвонової бронзи (рис. 4) [10].

Як показали дослідження [11], враховуючи умови експлуатації (ударне навантаження, старін-

ня металу, атмосферну корозію та ін.) акустичні властивості дзвонової бронзи різко знижуються. Проте найчастіше дзвони втрачають своє призначення через утворення в них тріщин (рис. 5).

Саме з такими дефектами були передані для ремонту декілька дзвонів різних розмірів (та й різних виробників). У табл. 2 і 3 наведено дані стосовно габаритних розмірів дзвонів і хімічного складу бронзи.

Візуальний контроль дзвонів показав, що тріщини зароджуються в нижній частині дзвону (ударному поясі) і поширюються вгору. Слід зазначити, що конструктивно стінки дзвонів мають нерівномірну товщину: максимальна в ударному поясі, у верхній частині – значно меншу. Так, метал найдовшої тріщини в дзвоні К-2 у верхній частині мав товщину 8 мм, а метал ударного поясу дзвону К-3 – 48 мм. Фактично заварювання тріщини являє собою виконання стикового шва металу змінної товщини, що знаходиться в жорстких умовах закріплення.

З літературних джерел відомо, що при ремонті дзвонів застосовують способи паяння та зварювання. Автори [12] стверджують, що їм вдалося відремонтувати дзвін із застосуванням паяння, у якості присаджувального матеріалу вони використовували порошки на основі міді, а в [13] застосовували прутки з матеріалу, аналогічного металу дзвону, які були отримані ливарним способом. Автори [14] у своїх науково-практичних дослідках з відновлення цілісності дзвонів 16-го та 19-го сторіччя застосовували як метод паяння, так і зварювання. При цьому, як і в [15], перед ремонтом дзвін повністю підігрівали та повільно охолоджували. Однак така

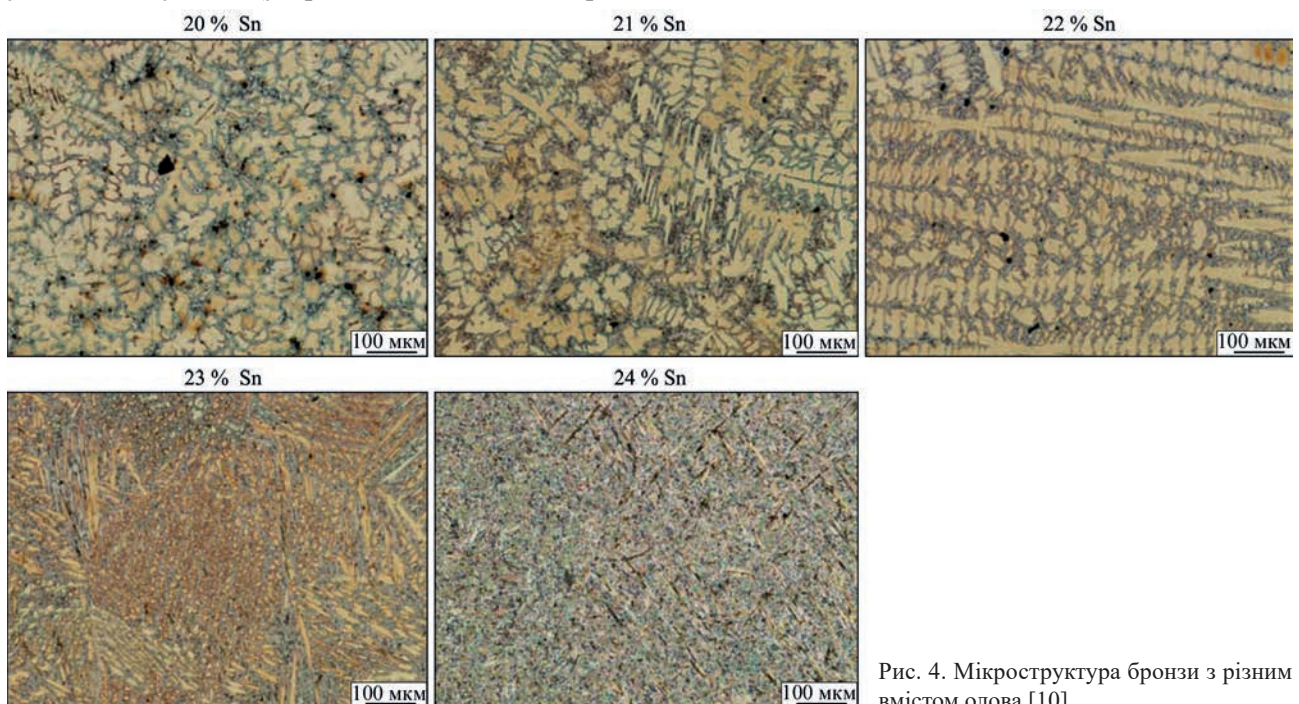


Рис. 4. Мікроструктура бронзи з різним вмістом олова [10]



Рис. 5. Зовнішній вигляд дзвону з тріщиною

Таблиця 2. Основні габаритні розміри дзвонів

Дзвін	Висота H , мм	Діаметр D , мм	Довжина тріщини l , мм
К-1	250	300	90
К-2	400	465	230
К-3	490	580	160

Таблиця 3. Хімічний склад бронзи, %

Дзвін	Sn	Zn	Pb	Cu
К-1	15,6...16,2	–	< 0,5	зал.
К-2	17,0...17,8	1,3	< 1,0	зал.
К-3	20,4...21,3	< 1,0	–	зал.



Рис. 6. Зовнішній вигляд обробленої тріщини (а) і схема зварювання тріщини (б)

технологія є затратною та не завжди надає позитивні результати. Тому, на наш погляд, доцільнішим та економічно обґрунтованим способом зварювання для виконання ремонтних робіт з відновлення дзвонів є TIG-процес без попереднього підігріву із застосуванням спеціальних присадних дротів. Такі металопорошкові драти забезпечують отримання металу шва, близького за складом до дзвонів бронзи, а, відповідно, й її акустичних властивостей.

Традиційно кінець тріщин перед їх розчищенням під зварювання розсверлюється (рис. 6). Враховуючи товщину металу, зварювання тріщин виконується двобічними багатопрхідними швами, що формуються наплавленням невеликих (8...10 мм) валиків (рис. 7), причому кожен з них додатково проковується з метою зниження термічних напружень.

В якості захисного газу використовується аргон. Параметри режиму зварювання $I_{зв} = 140...180$ А, $U_d = 10...15$ В, $Q_{Ar} = 10...15$ л/хв, $d_{ел} = 3,0...4,0$ мм.



Рис. 7. Зовнішній вигляд зварного шва



Рис. 8. Відновлений дзвін К-3 ззовні (а) та всередині (б)

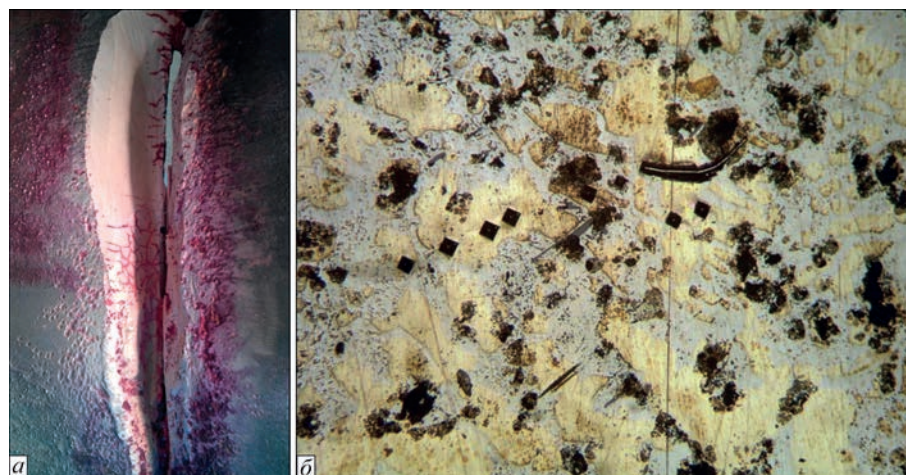


Рис. 9. Дефекти в зоні термічного впливу: мікротріщини (а), пори (темні місця неправильної форми) (б)



Рис. 10. Статуя Венери-купальниці (Національний дендрологічний парк «Софіївка», м. Умань)

Із трьох переданих для ремонту дзвонів успішно були відновлені дзвони К-1 та К-3 (рис. 8).

У дзвіні К-2, що мав найбільш протяжну тріщину, в процесі ремонту виникла нова тріщина протяжністю до 200 мм. Додатковий контроль якості цього дзвону після зварювання методом капілярної дефектоскопії виявив наявність у металі внутрішніх мікротріщин, які в процесі заварювання розчищеної тріщини призводять до подальшого розтріскування дзвону (рис. 9, а). Крім того, у металі зони термічного впливу утворились пори (рис. 9, б).

Тому при оцінці ремонтпридатності дзвону необхідна всебічна діагностика його якості. Контроль якості відновлених дзвонів і оцінка їх акустичних властивостей (характеру та мелодійності звучання) підтвердив можливість і доцільність ремонту церковних дзвонів за створеними технологіями та застосуванням спеціальних металопорошкових дротів.

Відновлення бронзової чаші дендропарку «Софіївка». В Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України з проханням надати технічну допомогу у відновленні раритетного



Рис. 11. Частини бронзової чаші



Рис. 12. Бронзова чаша після реставрації (а) та через 5 років після встановлення в Національному дендрологічному парку «Софіївка» (б)

художнього виробу – бронзової чаші 19-го сторіччя – звернулася дирекція Національного дендрологічного парку «Софіївка» (м. Умань). Ця чаша була встановлена біля статуї Венери-купальниці (рис. 10), наповнювалась джерельною водою, яка потім по гранітному підземному каналу стікала в

нижній став. Ручки чаші декоративно виготовлені у вигляді вужів [16].

«Мисливці за металобрухтом» зірвали чашу з постаменту, порізали ручки на 14 частин. Декількох частин від «вужів» не вдалося знайти (рис. 11).



Рис. 13. Пам'ятник В.І. Толубинському з відбитою рукою (а) та після зварювання покритими електродами (б)

Однією з умов ремонту була необхідність отримання декоративного кольору металу швів, близького до кольору чаші. Згідно з даними масо-спектрального аналізу чаша була виготовлена з ливарної бронзи типу БрОЦС. Найраціональнішим для ремонту є використання, як і при ремонті церковних дзвонів, TIG-процесу з присаджувальним матеріалом типу металопорошкового дроту відповідного складу.

Окрім зварювання деталей, які були пошкоджені, було виготовлено частини вужів, які не вдалося знайти. До того ж, довелося виготовити спеціальний ручний інструмент для отримання «луски» на поверхні частин вварених «вужів» і зварних швах.

На рис. 12 наведено фотографію відновленої чаші, яка повернулася на своє історичне місце до дендропарку «Софіївка».

Зварювання фрагментів пам'ятника. При виготовленні ливарних виробів типу пам'ятників, бюстів та інших габаритних скульптур виникає потреба у з'єднанні їх окремих фрагментів. Актуальною також є проблема заварювання дефектів литва, що виникають у процесі виготовлення виробу. Для виконання таких робіт успішно використовуються сучасні зварювальні технології – MIG/MAG, TIG, а також ММА. В умовах індивідуального виробництва – майстерні скульптора, на монтажній площадці та ін. – найдоцільнішим є ММА-процес, що не потребує спеціального обладнання. Таким, наприклад, є ремонт пам'ятника академіку АН УРСР В.І. Толубінському (рис. 13), в якого в результаті падання з постаменту була відбита рука у двох місцях та зверсток.

Враховуючи хімічний склад, з якого виготовлено даний пам'ятник, і наявні в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України напрацювання щодо розробки покритих електродів на основі міді [17–19], було виготовлено дослідну партію електродів. Проведення зварювальних робіт з ремонту даного виробу підтвердило високу якість зварного шва та, що важливо в таких випадках, співпадіння кольору шва з кольором основного металу.

Висновки

1. Виконано дослідження хімічного складу та структурних особливостей пошкоджених художніх виробів із мідних сплавів. Встановлено, що хімічний склад скульптур, особливо тих, що виготовленні більше століття тому, не завжди відповідає встановленим нормативним документам сьогодення, що призводить до необхідності індивідуального підходу при розробці зварювальних матеріалів при їх ремонті.

2. Створено спеціальні металопорошкові дроти та покриті електроди, які забезпечують отримання

як високих показників міцності зварних з'єднань, так і їх необхідних декоративних властивостей.

3. Проведені дослідно-експериментальні роботи з відновлення ливарних виробів із мідних сплавів, у тому числі й дзвонової бронзи, та отримані позитивні результати дають можливість суттєво розширити впровадження ремонтно-зварювальних технологій у практику реставрації таких виробів.

Список літератури

1. Лякишев Н.П. (1997) *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник*. Москва, Машиностроение.
2. Абрамович В.Р., Демянцевич В.П., Ефимов Л.А. (1988) *Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе*. Ленинград, Машиностроение, Ленинградское отд-ние.
3. Сучков Д.И. (1967) *Медь и ее сплавы*. Москва, Металлургия.
4. Лебедев К.П., Райнес Л.С., Шемтов Г.С. и др. (1973) *Литейные бронзы*. Ленинград, Машиностроение.
5. Le Jeune Road, N.W. (1997) *Welding copper and copper alloys*. Miami, American welding society.
6. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. (1974) *Промышленные цветные металлы и сплавы*. Москва, Металлургия.
7. Савета В.С., Хрычиков В.Е., Матвеева М.О. (2014) *Художественное и ювелирное литье: Учебное пособие*. Днепрпетровск, НМетАУ.
8. *Майстерня дзвонів Royal Bells*. Перемишль. URL: <https://dzvony.net/home> (дата звернення 20.01.2025).
9. *Різновиди церковних дзвонів у православній традиції*. Полтава. URL: <http://dzvonar.com.ua> (дата звернення 10.01.2025).
10. Nadolski, M. (2017) The evaluation of mechanical properties of high-tin bronzes. *Archives of Foundry Engineering*, 17(1), 127–130. DOI: <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0023>
11. Audy, J., Audy, K. (2009) Analysis of bell materials: Tin bronzes. *China Foundry*, 58(1), 77–81. DOI: [https://doi.org/10.1672-6421\(2008\)03-0199-06](https://doi.org/10.1672-6421(2008)03-0199-06)
12. Ernesto Ponce L., José de la Vega (2014) Restoration of ancient bronze bells. Part I: Powder metallurgy. *Revista chilena de ingeniería*, 22(4), 460–468. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052014000400002>
13. Bartocha, D., Baron, C. (2021) Repair of a cracked historic Maryan Bell by gas welding. *Materials*, 14(10), 2504. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14102504>
14. Ernesto Ponce, L. (2015) Restoration of ancient bronze bells. Part II: Welding. *Revista chilena de ingeniería*, 23(1), 30–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052015000100004>
15. (2017) *Friends of the Truro Meeting House. Revere bell restoration*. <https://www.truromeetinghousefriends.com/wp-content/uploads/2016/06/2016-Spring-Newsletter-05142016.pdf>
16. Косенко І.С., Пилип'юк В.В. (2016) *Софіївка. Національний дендрологічний парк: фотоальбом*. Київ, Паливода А.В.
17. Лющенко В.М., Майданчук Т.Б., Аношин В.О., Скорина М.В. (2014) *Склад електродного покриття для зварювання та наплавлення олов'яних бронз*. А.с. № 106954 UA, B23K 35/365(2006.01). №а 2013 14841; Заявл.18.12.2013; Опубл. 27.10.2014. Бюл. №20.
18. Майданчук Т.Б., Скорина Н.В. (2014) Улучшение технологичности изготовления и сварочных свойств электродов для сварки и наплавки оловянных бронз. *Автоматическая сварка*, 6-7, 176–182.
19. Лющенко В.М., Лукьянченко Е.П. (сост.) (2013) *Сварка и наплавка меди и медных сплавов*. Киев, Международная ассоциация «Сварка».

References

1. Liakyshev, N.P. (editor) (1997) *State diagrams of binary metallic systems: Referbook*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Abramovich, V.R., Demiantsevich, V.P., Efimov, L.A. (1988) *Fusion welding of copper and copper-based alloys*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
3. Suchkov, D.Y. (1967) *Copper and its alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

4. Lebedev, K.P., Raines, L.S., Shemtov, H.S. et al. (1973) *Cast bronzes*. Leningrad, Mashnostroenie [in Russian].
5. Le Jeune Road, N.W. (1997) *Welding copper and copper alloys*. Miami, AWS.
6. Smiriagin, A.P., Smiriagina, H.A., Belova, A.B. (1974) *Industrial non-ferrous metals and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. Savega, V.S., Hrichikov, V.E., Matveeva, M.O. (2014) *Artistic and jewelry casting: Tutorial*. Dnipro, NMetAU [in Ukrainian].
8. *Royal Bells Workshop. Przemysl*. <https://dzvony.net/home> (date of application 20.01.2025) [in Ukrainian].
9. *Varieties of church bells in the Orthodox tradition. Poltava*. <http://dzvonar.com.ua> (date of application 10.01. 2025) [in Ukrainian].
10. Nadolski, M. (2017) The evaluation of mechanical properties of high-tin bronzes. *Archives of Foundry Eng.*, 17(1), 127–130. DOI: <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0023>
11. Audy, J., Audy, K. (2009) Analysis of bell materials: Tin bronzes. *China Foundry*, 58(1), 77–81. DOI: [https://doi.org/1672-6421\(2008\)03-0199-06](https://doi.org/1672-6421(2008)03-0199-06)
12. Ernesto, Ponce L., José de la Vega (2014) Restoration of ancient bronze bells. Pt I: Powder metallurgy. *Revista Chilena de Ingenieria*, 22(4), 460–468. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052014000400002>
13. Bartocha, D., Baron, C. (2021) Repair of a cracked historic Maryan Bell by gas welding. *Materials*, 14(10), 2504. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14102504>
14. Ernesto Ponce, L. (2015) Restoration of ancient bronze bells. Pt II: Welding. *Revista Chilena de Ingenieria*, 23(1), 30–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052015000100004>
15. (2017) *Friends of the Truro Meeting House. Revere bell restoration*. <https://www.truromeeetinghousefriends.com/wp-content/uploads/2016/06/2016-Spring-Newsletter-05142016.pdf>
16. Kosenko, I.S., Pylypiuk, V.V. (2016) *Sofiivka. Arboretum: Photoalbum*. Kyiv, Palyvoda A.V. [in Ukrainian].
17. Iliushenko, V.M., Maidanchuk, T.B., Anoshin, V.O., Skoryna, M.V. (2014) *Composition of electrode coating for welding and surfacing tin bronzes*. Pat. UA 106954, Fill. 18.12.2013, Publ. 27.10.2014 [in Ukrainian].
18. Majdanchuk, T.B., Skorina, N.V. (2014) Improvement of adaptability to fabrication and welding properties of electrodes for tin bronze welding and surfacing. *The Paton Welding J.*, 6–7, 172–176. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.37>
19. Iliushenko, V.M., Lukianchenko, Ye.P. (2013) *Welding and surfacing of copper and copper alloys*. Kyiv, International Association «Welding» [in Russian].

RESTORATION OF BELLS AND ARTISTIC CASTINGS PRODUCTS MADE OF COPPER ALLOYS

T.B. Maidanchuk, A.M. Bondarenko, V.M. Ilyushenko, E.P. Lukyanchenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: pwi_37@ukr.net

The results of experimental work on the restoration of artistic castings from copper alloys are presented. It is shown that an individual approach is required during product repair, which is associated with the different chemical composition and presence of defects in the cast metal, the shape and size of the product, the need to adjust the chemical composition of welding consumables, etc. It is determined that when restoring bells, the most appropriate process for performing repair work is the process of manual argon-arc welding with a nonconsumable electrode (TIG process). It is shown that positive results in welding up cracks in church bells while ensuring their high acoustic properties are achieved with the correct choice of filler material. Coated-electrode welding can be recommended for welding up casting defects, as well as for manufacturing welded components of sculptures. 19 Ref., 3 Tabl., 13 Fig.

Keywords: foundry bronzes, chemical composition, bell bronze, cracks, repair and welding technologies, metal-cored wire, coated electrodes

Отримано 24.04.2025

Отримано у переглянутому вигляді 16.06.2025

Прийнято 09.10.2025

INTERNATIONAL WIRE AND CABLE TRADE FAIR
wire
Düsseldorf

INTERNATIONAL TUBE AND PIPE TRADE FAIR
Tube
Düsseldorf

COME & CONNECT

APRIL 13 - 17 2026
DÜSSELDORF
GERMANY

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТА БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ СПОСОБОМ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

А.С. Новодранов, О.М. Савицький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: artur19940731@gmail.com

У наш час технологія 3D друку активно розвивається та знаходить застосування у виготовленні деталей для різних галузей промисловості. У роботі визначено переваги, недоліки, а також особливості наплавлення деталей складної форми із застосуванням імпульсної дуги та дуги постійної потужності. Досліджено чотири способи роботизованого наплавлення, серед яких – три варіації імпульсного режиму, які забезпечують високу якість наплавленого металу та дрібнозернисту структуру. Проведено випробування наплавленого металу на ударну в'язкість. Усі зразки, незалежно від способу наплавлення, показали високі показники ударної в'язкості. Виготовлення металевих деталей за допомогою адитивного наплавлення може супроводжуватися появою поверхневих дефектів у наплавлених шарах, а саме пор і тріщин. Застосування робототехнічного комплексу на базі антропоморфного робота з інтегрованою системою машинного зору дозволяє підвищити якість і продуктивність процесу наплавлення. Результати дослідження макро- та мікроструктури зразків наплавленого металу підтвердили коректність роботи системи виявлення дефектів. У результаті проведених досліджень виготовлено експериментальний зразок бурового шнеку шляхом роботизованого наплавлення із застосуванням дуги постійної потужності. Бібліогр. 13, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: 3D технологія, WAAM наплавлення, антропоморфний робот, система машинного зору, розпізнавання дефектів, дуга постійної потужності, імпульсна дуга

Вступ. За останні десятиліття номенклатура конструкційних матеріалів значно розширилася завдяки впровадженню нових матеріалів як металевих, так і неметалевих походження. Однак, незважаючи на це, основним конструкційним матеріалом сучасності й найближчого майбутнього є вуглецеві сталі. Це обумовлено рядом факторів: порівняно дешевизною вуглецевих сталей; високим рівнем освоєння технологій їх виробництва та обробки; широкою номенклатурою сталей з різними експлуатаційними характеристиками; можливістю покращення їх властивостей термічною та механічною обробкою. Основним технологічним процесом отримання нероз'ємних з'єднань зі сталей є зварювання та його різновид – наплавлення. За схильністю до утворення якісних зварних з'єднань (зварюваність) вуглецеві сталі поділяються на: зварювані без обмежень, обмежено зварювані та не рекомендовані для зварних конструкцій [1]. Низьковуглецеві леговані та нелеговані сталі зварюються без обмежень, обмежено зварювані – це середньовуглецеві леговані та нелеговані сталі. У свою чергу, сталі з високим вмістом вуглецю не рекомендовані для зварних конструкцій [1, 2]. Обмежено зварювані сталі вимагають застосування підігріву, термообробки після зварювання та наплавлення або використання аустенітних матеріалів. Ці технологічні прийоми не потрібні для

сталей, що зварюються без обмежень. Отримати якісні зварні з'єднання сталей, не рекомендованих для зварних конструкцій, без тріщин і крихкого руйнування вважається неможливим.

Однак результати досліджень, викладені в [4–6], свідчать, що в ІЕЗ ім. Є.О. Патона були розроблені способи, які забезпечують зварювання та наплавлення обмежено зварюваних сталей і сталей, не рекомендованих для зварних конструкцій, без підігріву та термообробки матеріалами ферито-перлітного класу (не аустенітними). Зазначені методи засновані на використанні імпульсної дуги [5] з періодичним її перериванням та повною періодичною кристалізацією зварювальної ванни. Вони забезпечують керування процесами структуроутворення в металі зварних з'єднань. Структура є основним фактором, від якого залежать властивості металу. У процесі зварювання в з'єднаннях формувалися структури з високими показниками пластичності, в'язкості та тріщиностійкості. Однак при зварюванні та наплавленні низьковуглецевих сталей ці методи не застосовувалися, а інформації щодо їх впливу на структуру та властивості металу в наукових джерелах не знайдено.

В останні десятиліття в промислово розвинутих країнах широкого застосування набули 3D технології [7–10]. Це обумовлено високою продуктивністю, якістю виробів і значним рівнем роботизації

процесів наплавлення. Багатошарове наплавлення – один з процесів, що застосовується при виготовленні металоконструкцій з використанням 3D технологій, наприклад бурового обладнання. Дугове наплавлення являє собою термічний процес з локальним високотемпературним впливом на метал і достатньо потужним тепловкладенням. При багатошаровому напавленні під впливом зазначених чинників у попередньо напавленому металі відбуваються структурні перетворення, зміна напруженого стану та теплофізичних параметрів. Все це в сукупності може призводити до погіршення тепловідводу із рідкої зварювальної ванни. У результаті збільшується тривалість перебування в температурному інтервалі крихкості [2] або кристалізації [3], посилюються ліквідаційні процеси [2] і зростає вірогідність утворення гарячих тріщин. Надмірне перебування твердого металу попередньо напавлених шарів в області високих температур може призвести до його перегріву, росту зерна, що негативно впливає на показники в'язкості металу. Результатом є крихке руйнування в процесі експлуатації виробу. Одним з напрямків, що забезпечить попередження небезпеки утворення вказаних дефектів, може бути застосування імпульсної дуги.

Метою дослідження був аналіз способів напавлення, зокрема імпульсною дугою та дугою постійної потужності, з подальшим вибором найбільш придатного способу для виготовлення фрагменту бурового інструменту з урахуванням впливу кожного розглянутого способу напавлення на структуру та в'язкість напавленого металу, а також забезпечення відсутності поверхневих дефектів.

Для цього необхідно було вирішити низку завдань, а саме: обґрунтувати вибір обладнання для вирішення поставленої задачі; дослідити якість формування напавленого металу та його структури; проаналізувати вплив імпульсної дуги та дуги постійної потужності на ударну в'язкість напавленого металу.

Обладнання, матеріали та методика проведення експериментів. Для забезпечення об'єктивності експериментальної частини дослідження необхідно звести до мінімуму вплив людського фактора на результати експериментів. Тому обладнання повинно забезпечувати максимальний рівень автоматизації процесу напавлення. З обладнанням для напавлення дугою постійної потужності проблем не виникало. Не виникає проблем і з обладнанням для імпульсно-дугового зварювання дугою змінної потужності, тобто коли періодично змінюється потужність дуги без її переривання. У наявності широкий вибір авто-

матизованого зварювального обладнання для реалізації вказаних способів напавлення, яке випускається серійно. Для зварювання та напавлення імпульсною дугою з періодичним перериванням дуги та періодичною повною кристалізацією зварювальної ванни обладнання не знайдено. У період 1990–2005 рр. таке обладнання розроблялося в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, але через економічні негаразди його серійне виробництво не було розпочато. Тому для вирішення цієї проблеми був застосований робототехнічний комплекс (РТК) (рис. 1, а) на базі антропоморфного робота Fanuc ARC Mate 100iC/7L. Програмне забезпечення робота дозволяє запрограмувати його на виконання напавлення імпульсною дугою за різними технологічними алгоритмами. Суттєвою перевагою автоматизації процесу напавлення є мінімізація впливу людського фактора на виробництво, навіть до його повного виключення. До основних причин виникнення дефектів напавлення відносяться: невірно обрана технологія напавлення, порушення роботи зварювального обладнання, неякісні або невірно вибрані зварювальні матеріали та інші фактори. Оскільки на даний час неможливо забезпечити повністю бездефектний процес напавлення, то ймовірність утворення поверхневих дефектів значною мірою залежить від досконалості технології напавлення та якості зварювальних матеріалів. У разі несвоєчасного виявлення таких дефектів може відбуватися утворення аналогічних дефектів у наступних шарах, що може спричинити погіршення експлуатаційних характеристик виробу. Під час автоматизованого напавлення за допомогою робототехнічного комплексу сопло пальника поступово забруднюється зсередини внаслідок потрапляння бризок. Це призводить до погіршення газового захисту зони зварювання, що, у свою чергу, може спричинити появу пор у металі напавленого шару. Частково дану проблему можливо вирішити застосуванням станції автоматичного очищення пальника, що суттєво знизить ймовірність появи пор, але не гарантує їх повну відсутність. Наявність тріщин після напавлення, наприклад зносостійких шарів із використанням високоміцного дроту, може призвести до руйнування виробу в процесі експлуатації. Напавлення зносостійких шарів супроводжується підвищенням твердості та міцності напавленого шару, проте одночасно робить його більш крихким. Це обумовлено значною кількістю вуглецю та легуючих елементів, таких як хром, молібден і ванадій, у зварювальному дроті. У типових системах роботизо-

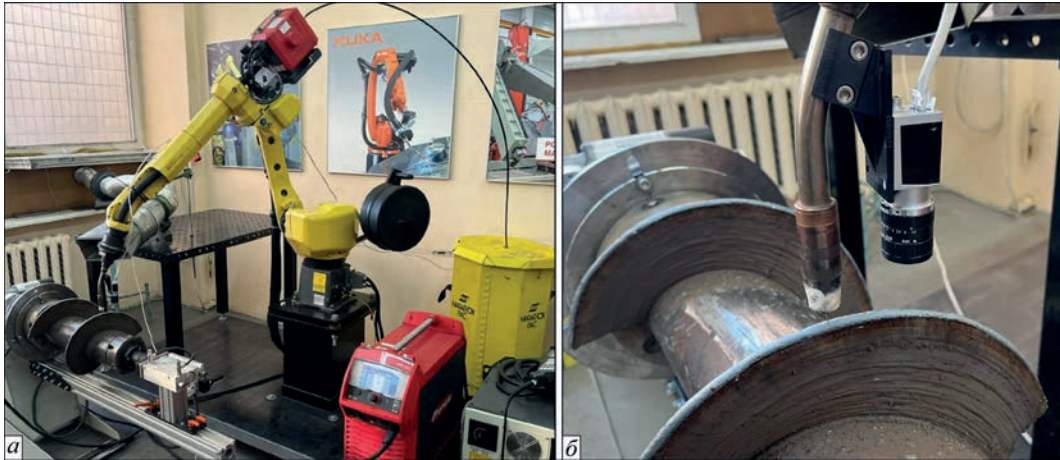


Рис. 1. Робототехнічний комплекс: а – загальний вигляд; б – система машинного зору

ваного наплавлення оператор виконує функцію візуального контролю якості наплавленого шару, що може призвести до пропуску деяких дефектів, особливо на довгомірних деталях. З метою недопущення пропуску поверхневих дефектів зварювальний робот оснащено системою машинного зору (рис. 1, б), що дало змогу здійснювати контроль наявності дефектів у наплавленому шарі. Апаратна частина системи складається з кольорової швидкісної GigE камери Basler acA1920-48gc, жорстко закріпленої на пальнику на спеціальному кріпленні, та контролера обробки зображень. Програмна частина системи технічного зору використовує алгоритм попередньо навченої згорткової нейронної мережі з архітектурою YOLOv5. Для навчання використано власний датасет (набір зображень), представлених у вигляді двовимірних кольорових зображень, що містять поверхневі дефекти, а саме пори й тріщини. Розмір навчальної вибірки склав близько 600 зображень. Нейронну мережу навчено за методом контрольованого машинного навчання. У зв'язку з обмеженим обсягом зображень для навчання було застосовано метод аугментації даних, який передбачає створення змінених версій зображень шляхом геометричних і кольорових перетворень. За результатами нав-

чання отримано модель нейронної мережі, здатну виявляти та класифікувати поверхневі дефекти, що виникають під час адитивного наплавлення металевих деталей. Тривалість процесу навчання становила 150 епох. Сканування поверхні наплавленого шару відбувалося після завершення процесу наплавлення під час остигання шару, щоб не витратити додатково виробничий час [13].

Для проведення дослідження було виконано наплавлення основного металу чотирма різними способами із застосуванням низьковуглецевого низьколегованого дроту суцільного перерізу Esab OK Aristo Rod 12.50 діаметром 1,2 мм, хімічний склад якого наведено в табл. 1. У якості захисного газу використовувалася суміш 85 % Ar + 15 % CO₂.

Перший спосіб передбачав наплавлення в імпульсному режимі з повною періодичною кристалізацією зварювальної ванни, без коливань електрода. Алгоритм полягав у наступному: в імпульсі – зупинка пальника та наплавлення, у паузі – переривання дуги та переміщення пальника на фіксовану відстань вздовж траєкторії наплавлення. Кожний наступний прохід починався з точки початку попереднього [11].

Другий спосіб був майже аналогічний до першого, за винятком чергування напрямку вектору

Таблиця 1. Характеристики зварювальних дротів для наплавлення

Спосіб	Марка дроту	Твердість, HRC	Тип дроту	Діаметр дроту, мм	Хімічний склад, %							
					C	Si	Mn	Cr	W	Co	Mo	V
Дріт для наплавлення основних шарів металу												
1-4	Esab OK Aristo Rod 12.50	-	Суцільний	1,2	0,10	0,72	1,11	-	-	-	-	-
Дроти для наплавлення зносостійких шарів металу												
1	Esab OK Autrodur 56 GM	50...60	Суцільний	1,6	0,40...0,50	2,70...3,30	≤0,80	8,0-10,0	-	-	-	-
2	Esab OK Tubrodur 53 GM	50...55	Порошковий	1,6	0,4	1,1	1,1	1,8	8,0	2,0	0,4	0,4
3	Esab OK Autrodur 58 GM	58...60	Суцільний	1,2	1,04	1,82	1,87	0,48	-	-	-	-
4	Esab OK Autrodur 58 GM	58...60	Суцільний	1,2	1,04	1,82	1,87	0,48	-	-	-	-

наплавлення. Кожний наступний прохід починався з точки закінчення попереднього, що дозволило зменшити просідання шарів у кінцевій точці наплавлення [11, 12].

Третій спосіб також передбачав наплавлення в імпульсному режимі. На відміну від першого та другого способів, його алгоритм полягав у наступному: в імпульсі відбувалося наплавлення під час переміщення пальника, а в паузі – переривання дуги та зупинка. Наплавлення виконувалося із круговими коливаннями електрода. Кожний наступний прохід починався з точки закінчення попереднього [11, 12].

Четвертий спосіб передбачав наплавлення дугою постійної потужності з круговими коливаннями електрода. Кожний наступний прохід починався з точки закінчення попереднього [11, 12].

У табл. 2 і 3 наведено параметри режимів наплавлення основних і зносостійких шарів металу [11, 12]: I – зварювальний струм; V_{WF} – швидкість подавання дроту; U – напруга дуги; F – частота коливань; A – амплітуда коливань; τ_i – тривалість імпульсу горіння дуги; τ_n – тривалість паузи горіння дуги; V_R – швидкість переміщення пальника; Δ – крок переміщення пальника.

Усі чотири способи наплавлення передбачали охолодження металу між проходами до температури 70 °С. Після наплавлення основних шарів металу заввишки 130 мм виконувалося наплавлення зносостійких шарів металу. Наплавлення виконувалося тими ж способами та за умов, аналогічних до наплавлення основних шарів металу. Характеристики та хімічний склад зносостійких дротів наведено в табл. 1. Висота зносостійких шарів складала 10 мм.

Для порівняння продуктивності наплавлення всіма чотирма способами проводилися вимірювання часу, необхідного для виконання одного проходу (наплавлення одного шару) за допомогою електронного секундоміра. Під час наплавлення імпульсними методами з періодичним перериванням дуги на один прохід витрачалося 158 с, тоді як при наплавленні дугою постійної потужності – лише 68 с.

Таблиця 2. Параметри режимів наплавлення основних шарів металу

Спосіб, №	I , А	V_{WF} , м/с	U , В	F , Гц	A , мм	τ_i , с	τ_n , с	V_R , мм/с	Δ , мм
1	160	6	26	–	–	1	2	4	6
2	160	6	26	–	–	1	2	4	6
3	154	5,3	26	2	0,5	1	2	4	6
4	154	5,3	26	2	0,3	–	–	4	–

Таблиця 3. Параметри режимів наплавлення зносостійких шарів металу

Спосіб, №	I , А	V_{WF} , м/с	U , В	F , Гц	A , мм	τ_i , с	τ_n , с	V_R , мм/с	Δ , мм
1	200	3,5	30	–	–	1	2	4	6
2	220	4,0	30	–	–	1	2	4	6
3	154	5,3	26	2	0,5	1	2	4	6
4	154	5,3	26	2	0,5	–	–	4	–

З наплавленого металу вирізалися заготовки для виготовлення зразків, які використовувалися для дослідження макро- та мікроструктури, а також випробувань на ударну в'язкість. Металографічні дослідження проводилися на оптичному мікроскопі Neophot-32 з різними рівнями збільшення. Визначення розміру зерна проводили шляхом порівняння зі шкалами ДСТУ 8972:2019 «Метод виявлення та визначення величини зерна». Процентне співвідношення фаз вираховували планіметричним методом з використанням квадратно-сітчастого окуляра мікроскопа POLYVAR. Твердість металу вимірювали за методом Віккерса, за допомогою твердоміра М-400 фірми Лесо. Навантаження складало 10 Н (1 кг), час прикладення навантаження 10 с. Цифрові зображення структур різних ділянок наплавлення та металу ЗТВ одержані за допомогою фотокамери Olympus C-500.

Випробування на ударну в'язкість проводилися на зразках з круглим (Ми 47) і гострим надрізом (Ми 50 тип 11). Заготовки для виготовлення зразків вирізалися за наступною схемою. Два зразки кожного типу – вздовж шарів наплавлення та один поперек. Надрізи на зразках, вирізаних вздовж наплавлених шарів, розмічалися таким чином, щоб забезпечити удар у верхній і боковій площинах наплавлення.

Отримані результати та їх аналіз. Наплавлений метал по всій висоті наплавлення формується без дефектів. Пори, напливи, тріщини, несплавлення та зашлаковування відсутні (рис. 2). Крім цього, метал має щільну, дрібнозернисту, однорідну структуру. У верхній частині зразків чітко виділяється зносостійкий шар.

Детальний аналіз макрошліфів металу показує, що при наплавленні імпульсною дугою шари кристалізації фактично не проявляються (рис. 2, а–в). Метал має дрібнокристалічну, близьку до монолітної, структуру. При наплавленні дугою постійної потужності, навпаки, шари кристалізації проявляються чітко (рис. 2, з). Такі відмінності можна пояснити тим, що при наплав-

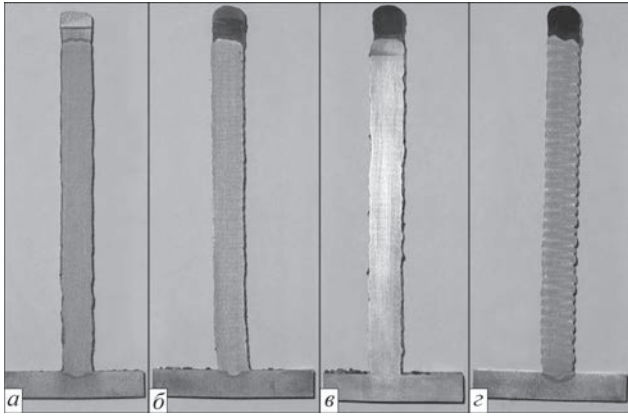


Рис. 2. Макрошліфи металу, наплавленого способами: *a* – першим; *б* – другим; *в* – третім; *г* – четвертим

ленні дугою постійної потужності циклічне чергування нагріву та охолодження металу відбувається за рахунок послідовного наплавлення шарів. При наплавленні імпульсною дугою циклічне чергування нагріву та охолодження відбувається також у межах одного проходу шляхом чергування імпульсів і пауз горіння дуги. Крім цього, при наплавленні імпульсною дугою відбувається періодична повна кристалізація ванни, що також сприяє подрібненню кристалітів [2–6].

Результати металографічних досліджень наведено на рис. 3. Вони показують, що структура низьковуглецевого металу, наплавленого усіма чотирма способами, являє собою суміш фериту з перлітом. Кількість фериту коливається в межах 80,75...89,25 %, відповідно процентне співвідношення перліту складає 19,25...10,75 %. Розміри зерен відповідають 7...10 балам за шкалами

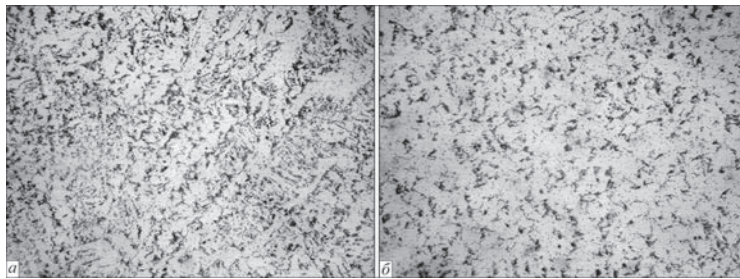


Рис. 3. Ферито-перлітна мікроструктура наплавленого низьковуглецевого металу ($\times 500$): *a* – 80,75 % фериту і 19,25 % перліту; *б* – 89,25 % фериту і 10,75 % перліту

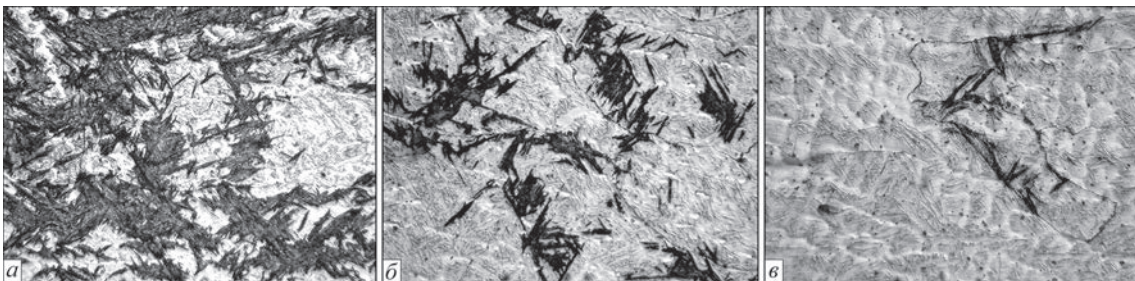


Рис. 4. Мартенсито-бейнітна мікроструктура наплавленого зносостійкого металу ($\times 500$): *a* – на границі з низьковуглецевим металом, 82,6 % нижнього бейніту і 17,4 % мартенситу; *б* – у центрі зносостійкого шару, 71,5 % нижнього бейніту і 28,5 % мартенситу; *в* – у верхній частині наплавлення, 1 % бейніту і 99 % мартенситу

ДСТУ. Твердість шару наплавлення становить 1890...1950 HV_{10} .

Мікроструктура зносостійкого наплавлення має структуру дрібногочастого мартенситу та нижнього бейніту. Співвідношення фазових складових змінюється за висотою наплавлення – біля границі з низьковуглецевим металом 82,6 % нижнього бейніту і 17,4 % мартенситу (рис. 4, *a*). У центральній частині – 71,5 % нижнього бейніту і 28,5 % мартенситу (рис. 4, *б*). Далі по висоті наплавлення кількість нижнього бейніту зменшується до 1 % (рис. 4, *в*). Твердість нижнього бейніту 4420...4640 HV_{10} , твердість дрібногочастого мартенситу досягає 6130...6360 HV_{10} , а більш узагальнена твердість складає 5590...6150 HV_{10} . Незважаючи на вміст мартенситу в мікроструктурі наплавленого зносостійкого шару, у всіх чотирьох способах тріщини в металі відсутні.

Результати випробувань на ударну в'язкість низьковуглецевого наплавленого металу наведено в табл. 4. Випробування проведено за температури навколишнього середовища +20 °С. Видно, що метал, наплавлений усіма чотирма способами, характеризується високими показниками ударної в'язкості за KCU та KCV , які близькі за своїми значеннями. Це пояснюється структурою металу, яка являє собою суміш перліту та фериту з переважаючим вмістом фериту.

Таким чином, проведені дослідження показали, що всі чотири застосовані в роботі способи наплавлення забезпечують близькі результати металографії, тобто мікроструктури, та процентний



Рис. 5. Наплавлений фрагмент бурового шнека

вміст їх складових, якість наплавленого основного та зносостійкого шарів. Однак наплавлення дугою постійної потужності має суттєву перевагу перед наплавленням імпульсною дугою. Воно за-

безпечує продуктивність наплавлення приблизно в 2,3 рази вищу за наплавлення імпульсною дугою з періодичним перериванням дуги. Це пояснюється відсутністю паузи горіння дуги. Результати дослідження макро- та мікроструктури підтвердили коректність роботи системи технічного зору на базі нейронної мережі YOLOv5, а саме – повну відсутність пор і тріщин у наплавлених шарах. Для оцінки якості навчання та класифікації обчислено метрики усередненої точності (mAP), а також точності (Precision) та повноти (Recall) [13]. Отримані значення становили: mAP = 89,8 %, Precision = 80,5 %, Recall = 89,4 %. За результатами дослідження розглянутих способів наплавлення для виготовлення експериментального фрагмента бурового шнека обрано спосіб роботизованого на-

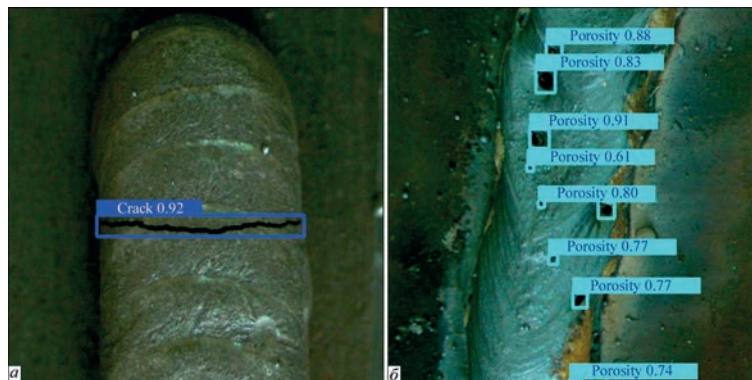


Рис. 6. Результат розпізнавання поверхневих дефектів: а – поперечна тріщина; б – пори

Таблиця 4. Результати випробувань зразків наплавленого металу на ударну в'язкість

Спосіб наплавлення	Тип зразка	Форма надрізу	Напрямок удару	KCU, Дж/см ²	KCV, Дж/см ²
№ 1	Ми 47	Круглий	Вздовж наплавлення, удар зверху	283,2	–
			Вздовж наплавлення, удар збоку	306,0	–
			Поперек наплавлення	343,0	–
	Ми 50 тип 11	Гострий	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	212,9
			Вздовж наплавлення, удар збоку	–	230,3
Поперек наплавлення			–	245,1	
№ 2	Ми 47	Круглий	Вздовж наплавлення, удар зверху	308,0	–
			Вздовж наплавлення, удар збоку	322,0	–
			Поперек наплавлення	290,2	–
	Ми 50 тип 11	Гострий	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	255,9
			Вздовж наплавлення, удар збоку	–	262,4
Поперек наплавлення			–	249,2	
№ 3	Ми 47	Круглий	Вздовж наплавлення, удар зверху	308,0	–
			Вздовж наплавлення, удар зверху	310,36	–
			Вздовж наплавлення, удар збоку	312,39	–
			Поперек наплавлення	338,64	–
	Ми 50 тип 11	Гострий	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	271,64
Вздовж наплавлення, удар збоку			–	256,19	
Поперек наплавлення			–	275,30	
№ 4	Ми 47	Круглий	Вздовж наплавлення, удар зверху	348,8	–
			Вздовж наплавлення, удар збоку	349,4	–
			Поперек наплавлення.	305,0	–
	Ми 50 тип 11	Гострий	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	254,0
			Вздовж наплавлення, удар збоку	–	265,1
Поперек наплавлення			–	266,5	

плавлення дугою постійної потужності, а результат представлено на рис. 5.

Результати роботи навченого алгоритму нейронної мережі YOLOv5 на експериментальних зразках для перевірки коректності розпізнавання із зазначенням класу дефекту та значення впевненості (confidence) наведено на рис. 6.

Висновки

1. У роботі обґрунтовано доцільність застосування робототехнічного комплексу при багатошаровому наплавленні деталей складної форми в захисних газах. Оснащений системою технічного зору, РТК забезпечує своєчасне виявлення поверхневих дефектів у наплавлених шарах, що дозволяє організувати повністю автоматизоване адитивне виробництво. Коректність роботи системи виявлення дефектів підтверджується результатами дослідження макро- та мікроструктури наведених зразків.

2. При багатошаровому роботизованому наплавленні всі розглянуті чотири способи забезпечують високу якість металу без тріщин, пор, несплавень і зашлаковувань, у металі формується дрібнозерниста структура (7...10 балів).

3. Перевагою наплавлення імпульсною дугою є подвійне термоцикування шляхом циклічної зміни імпульсів і пауз, а також почергового наплавлення шарів металу, що забезпечує практично монолітну структуру. Однак при цьому продуктивність наплавлення порівняно з дугою постійної потужності знижується приблизно у 2,3 рази.

4. Наплавлений метал має високі показники ударної в'язкості ($283,2 \leq KCU \leq 349,4$ Дж/см², $212,9 \leq KCV \leq 245$ Дж/см²).

Список літератури/References

1. Sorokin, V.G. (1989) *Data base of steels and alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Paton, B.E. (1974) *Technology of the fusion electric welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Sterenbogen, J.A., Petrov, P.F. (1979) The influence of the crystallization temperature range on the tendency of steels to form crystallization cracks during welding. *Avtomaticheskaya Svarka*, 7, 10–13 [in Russian].
4. Nazarchuk, A.T. (1997) The influence of portion-discrete formation of seams on the thermal cycle of arc fusion welding. *Avtomaticheskaya Svarka*, 5, 13–17 [in Russian].
5. Nazarchuk, A.T. (2000) Improvement of process of consumable electrode welding with an intermittent arc. *The Paton Welding J.*, 7, 28–31.
6. Nazarchuk, A.T., Snisar, V.V., Demchenko, E.L. (2003) Portioned heat input as a method to control structure of the weld and HAZ metal. *The Paton Welding J.*, 12, 34–37.
7. ASTM-International, ASTM Standard F2792- 12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
8. Anuj V. Dongaonkar, Rajesh M. Metkar (2018) Reconstruction of Damaged Parts by Integration Reverse Engineering (RE) and Rapid Prototyping (RP). *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0_14
9. Shah, A., Aliyev, R., Zeidler, H., Krinke, S. (2023) A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process. *J. Manuf. Mater. Process*, 7, 97. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>
10. Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G., Oliveira, J.P. (2019) Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12, 1121. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
11. Shapovalov, E.V., Novodranov, A.S., Vashchenko, V.M., Savytskyi, O.M., Klishchar, F.S. (2024) Robotic complex for multi-layer surfacing by periodic arc and control of surface defects of the deposited metal. *Avtomatichne Zvariuvannya*, 6, 43–50 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.06.07>
12. Shapovalov, E.V., Novodranov, A.S., Vashchenko, V.M., Savytskyi, O.M., Topchev, D.D. (2025) Specifications of using intermittent action and constant power arcs in 3D welding technologies. *Avtomatichne Zvariuvannya*, 2, 43–50 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.02.06>
13. Shapovalov, E.V., Novodranov, A.S. (2025) Applying neural network technologies for quality control in robotic surfacing. In: *Proc. of the VIIIth Intern. Conf. on Welding and Related Technologies*, Yaremche, Ukraine, 7–10 October 2024, 154–157. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518-31>

AUTOMATION OF THE MANUFACTURING PROCESS OF A DRILLING TOOL FRAGMENT USING ADDITIVE DEPOSITION METHOD

A.S. Novodranov, O.M. Savytskyi

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: artur19940731@gmail.com

Nowadays, 3D printing technology is actively developing and is used in the manufacture of parts for various industries. This paper outlines the advantages, limitations, and characteristics of surfacing complex-shaped parts using pulsed arc and constant power arc methods. Four robotic surfacing approaches were investigated, including three variations of the pulsed arc mode, which provided high-quality deposited metal and a fine-grained structure. The deposited metal was tested for impact toughness, and all samples demonstrated high impact toughness regardless of the surfacing method. However, the additive surfacing of metal parts may lead to surface defects such as pores and cracks in the deposited layers. The use of a robotic system based on an anthropomorphic robot with an integrated machine vision system enhances both the quality and productivity of the surfacing process. The analysis of macro- and microstructures of the deposited metal specimens confirmed the effectiveness of the defect detection system. As a result of the study, an experimental drilling auger was successfully manufactured via robotic surfacing using a constant power arc. 13 Ref., 4 Tabl., 6 Fig.

Keywords: 3D technology, WAAM deposition, anthropomorphic robot, machine vision system, defect recognition, constant power arc, pulsed arc

Отримано 25.04.2025

Отримано у переглянутому вигляді 19.06.2025

Прийнято 08.10.2025

ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ЗУБІВ ШЕСТЕРЕНЬ КАР'ЄРНОГО ЕКСКАВАТОРА ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

С.М. Козулін¹, А.А. Фомакін¹, Р.М. Міщенко¹, Л.М. Петренко²

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

²Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 54007, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9.
E-mail: university@nuos.edu.ua

Викладено результати експериментальних досліджень, виконаних з метою розробки високопродуктивної технології, устаткування та спеціального технологічного оснащення для відновлення п'ітчевого профілю зношених зубів шестерень приводу повороту платформи кар'єрних екскаваторів MARION 204-M «Super Front» електрошлаковим наплавленням (ЕШН). Розроблено конструкцію спеціального водоохолоджуваного формувального оснащення, що виключає необхідність механічного оброблення робочих профілів зубів після їх наплавлення. Розроблено конструкцію та виготовлено лабораторну наплавочну установку. Виконано пошук режимів ЕШН, що забезпечують гарантований сплав присаджувального металу з основним, а також якісне формування робочих поверхонь наплавлених зубів; відновлення зношених зубів дослідно-штатних шестерень ЕШН; оцінку працездатності відновлених шестерень згідно з результатами проведення експлуатаційних випробувань. Розроблено робочі креслення дослідно-промислової спеціалізованої установки для відновлення зношених зубів приводних шестерень і зубчастих коліс. Для реалізації технології відновлювального ремонту використовували серійний апарат А-535 УХЛ4 з джерелом живлення змінного струму ТШС 1000-3. Матеріал, з якого виготовлені приводні шестерні редукторів платформи екскаваторів, – високоміцна конструкційна сталь ІІS SCM4. В якості зварювальних матеріалів використовували серійний зварювальний дріт марки Св 30ХГСА і флюс плавлений АН-8. Досвід експлуатаційних випробувань показав, що відновлені шестерні мають хорошу плавність ходу та стійкість зубів під час роботи в реверсивному режимі в умовах значних знакозмінних і контактних навантажень. Знос зубів на рівні твірної окружності не перевищує 1,5...3,0 мм. Розроблено робочі креслення дослідно-промислової установки УД 484 УХЛ4 для відновлення зношених зубів шестерень і зубчастих коліс із застосуванням ЕШН. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: відновлення, шестерні, п'ітчевий профіль зубів, знос, електрошлакове наплавлення, плавкий мундштук, формувальне оснащення, якість сплавлення, установка для наплавлення, термічна обробка, експлуатаційні випробування

Вступ. Відновлення деталей машин і механізмів, схильних до зношування в процесі експлуатації, – важливий спосіб економії матеріальних і трудових ресурсів у багатьох галузях промисловості [1]. У собівартості відремонтованих машин на відсоток запасних частин припадає близько 70 %. Оскільки собівартість відновлення деталей становить 50...60 % від вартості їх виготовлення, збільшення обсягів відновлення деталей є реальним шляхом зниження витрат на ремонт машин і агрегатів.

Відновлення зношених деталей – це технологічний процес відновлення справного стану й ресурсу цих деталей шляхом повернення їм втраченої частини матеріалу через зношування та доведення до нормативних значень властивостей, що змінилися за час експлуатації машини. Особливе значення відновлювальне наплавлення має при ремонті великогабаритних, масивних, коштовних деталей машин, які виробляються за кордоном.

Під час розроблення родовищ корисних копалин відкритим способом виїмково-навантажувальні роботи є основним або одним з основних ви-

робничих процесів, а машини, що виконують ці роботи, – провідними машинами комплексів механізації відкритих гірничих робіт. Під час відкритого розроблення родовищ практично всіх видів корисних копалин при виконанні виїмково-навантажувальних робіт найбільшого поширення набули однокошові кар'єрні екскаватори. Технічні характеристики цих машин дають змогу використовувати їх у різноманітних гірничо-технічних умовах: місткість ковша – 5,7...68,8 м³; стандартна довжина стріли – 12,2...20,4 м; робоча маса – 330...3113 т.

Нині у вугільній, гірничодобувній та інших галузях промисловості експлуатується значний парк устаткування імпортного виробництва, у приводних механізмах якого використовуються великогабаритні відкриті зубчасті вінці й колеса, що працюють в умовах значних знакозмінних і контактних навантажень, а також абразивного зносу. Більшість з них не відпрацьовують регламентований ресурс у результаті передчасного зносу п'ітчевих профілів зубів, що виникають у процесі екс-

платуації. Це неминуче призводить до простоїв устаткування та необхідності закупівель запасних деталей по імпорту.

Основний вид зношування робочих профілів зубів шестерень – механічний, що проявляється як абразивний, втомний, під час заїдання та фретингу, рідше – гідроабразивний (газоабразивний). Близько 30 % дефектів припадає на зубчасті колеса та шестерні редукторів кар’єрних екскаваторів, з них 63,3 % – на редуктори повороту платформи (рис. 1) [2]. Під час капітального ремонту в процесі дефектації зубчастих передач унаслідок пластичної деформації вибраковують 30...35 % деталей, у разі викришування – 55...65 %, а за наявності тріщин – 5...16 %.

Під час виконання розкривних робіт на відкритих кар’єрах широке застосування знаходять одноковшові гусеничні екскаватори MARION 204-M «Super Front» (рис. 2), виготовлені корпорацією «Сумітомо Маріон Корпорейшн» (Японія–США) [3].

Найбільш швидкозношуваними деталями цих кар’єрних екскаваторів є приводні шестерні редуктора повороту платформи, які експлуатуються в реверсивному режимі в умовах значних знакозміінних навантажень і абразивного середовища. Існуючі методи відновлення зубів великомодульних шестерень із застосуванням багатопрхідного 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 присаджувального матеріалу з основним, небезпекою утворення міжшарових дефектів у вигляді неметалевих включень, пор, тріщин, викришування активних поверхонь зубів і таке інше. У зв’язку з цим розробка високоефективної технології та обладнання для відновлення зношених зубів шестерень приводу повороту поворотної платформи кар’єрного екскаватора є актуальним завданням.

Найбільші технічні можливості для підвищення продуктивності та якості ремонтних робіт має

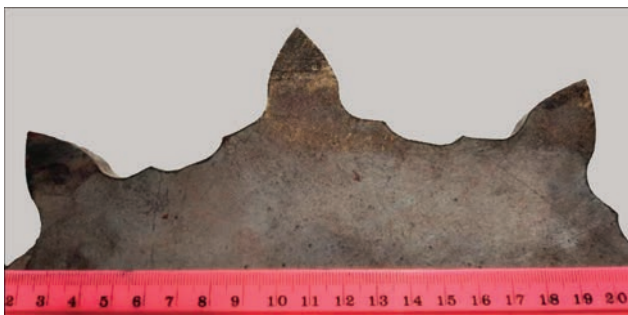


Рис. 1. Характерна форма абразивного зносу зубів шестерень приводу поворотної платформи кар’єрних екскаваторів



Рис. 2. Кар’єрний екскаватор MARION 204-M «Super Front» електрошлакове наплавлення (ЕШН), яке знайшло широке застосування при відновленні великогабаритних деталей машин, які експлуатуються у важкій, металургічній, енергетичній, цементній та інших галузях промисловості [4–6].

Метою даної роботи є розробка високопродуктивної технології, обладнання та спеціальної технологічної оснастки для відновлення зношених зубів шестерень редуктора повороту платформи кар’єрних екскаваторів MARION 204-M «Super Front» методом ЕШН.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити ряд завдань:

- розробка конструкції спеціального охолоджувального водою формувального оснащення, що включає необхідність механічного оброблення робочих профілів зубів після їх наплавлення;
- виконання лабораторних експериментальних досліджень з метою пошуку режимів і техніки виконання ЕШН плавким мундштуком, що забезпечують гарантоване сплавлення присаджувального металу з основним, а також якісне формування робочих поверхонь наплавлених зубів;
- розробка конструкції і виготовлення лабораторної наплавної установки, проектування та розробка робочих креслень дослідно-промислової спеціалізованої установки для відновлення зношених зубів приводних шестерень і зубчастих коліс;
- відновлення зношених зубів дослідно-штатних шестерень методом ЕШН;
- оцінка працездатності відновлених шестерень згідно з результатами проведення експлуатаційних випробувань.

Обладнання, матеріали та методика проведення експериментів. Для реалізації технології відновлювального ремонту використовували серійний апарат А-535 УХЛ4 з джерелом живлення змінного струму ТШС 1000-3. Матеріал, з якого виготовлені приводні шестерні редукторів плат-

Таблиця 1. Хімічний склад сталі JIS SCM4

Матеріал	Вміст хімічних елементів, %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P
Сталь JIS SCM4 (Японія)	0,38...0,43	0,50...0,80	0,15...0,35	0,90...1,20	0,25	0,15...0,30	0,30	≤ 0,03	≤ 0,03

форми екскаваторів, – високоміцна конструкційна сталь JIS SCM4 (табл. 1). В якості зварювальних матеріалів використовували серійний зварювальний дріт марки Св 30ХГСА і флюс плавлений АН-8У. Хімічний склад пластин і каналів плавкого мундштука підбирали розрахунково-експериментальним методом.

Методика виконання дослідних робіт передбачала:

- розрахунок геометричних параметрів профілю порожнини формуючого кристалізатора шляхом перерахунку із пітчевої системи на модульну з виразу:

$$m = 25,4/p,$$

де m – модуль зуба; p – діаметральний пітч. Розрахунки виконували за допомогою програми КОМПАС-3D V12;

- вибір зварювальних матеріалів для отримання хімічного складу наплавленого металу, що забезпечує рівномірність з’єднань основному металу, необхідну твердість і пластичність, відсутність гартувальних структур;

- відпрацювання режиму ЕШН виконували, використовуючи зразки зі сталі 09Г2С завтовшки 50 мм з розмірами 220×400 мм;

- спектральний аналіз основного та наплавленого металу;

- виготовлення та вивчення поперечних макрошліфів наплавлених з’єднань;

- контроль якості наплавлених з’єднань за допомогою переносного ультразвукового дефектоскопа УД2-12;

- визначення твердості наплавлених зубів із використанням портативного динамічного твердоміра ТЭМП-2;

- проведення загальної високотемпературної обробки відновлених шестерень в електричній печі з вискотним подом;

- розробку робочих креслень дослідно-промислової спеціалізованої наплавочної установки, виконану за допомогою конструкторської програми AutoCAD.

Отримані результати та їх аналіз. У результаті розрахунку геометричних параметрів зубів (перерахунку із пітчевої на модульну систему) отри-

мано форму профілю, що потребує відновлення, з параметрами: m (модуль) = 32,34; z (кількість зубів) = 11; коефіцієнт зміщення вихідного контуру +0,25; висота зубів 65 мм. Розроблено конструкцію та виготовлено формувальний пристрій, що складається з мідних водоохолоджуваних вузлів: кристалізатора, вхідної та вихідної формувальних планок, піддону [7].

Для кріплення відновлюваної шестерні, дискретного повороту її навколо своєї осі, переміщення та фіксації кристалізатора на виробі, виконання ЕШН зубів було розроблено та виготовлено лабораторну установку. Параметри режиму ЕШН розраховували з урахуванням раніше отриманих залежностей впливу параметрів режиму на якість зубів, наплавлених із застосуванням ЕШН [8, 9].

Для прискорення старту процесу наплавлення та забезпечення гарантованого сплавлення присаджувального металу з основним на початковій ділянці використовували метод «рідкого старту» шляхом заливання рідкого флюсу у вхідну кишеньку формувального пристрою, утворену порожниною кристалізатора, вхідною формувальною планкою та піддоном. У результаті відпрацювання оптимального режиму наплавлення встановлено, що задовільне формування наплавленого металу та якісне сплавлення присаджувального металу з основним забезпечується при виконанні ЕШН на питомій погонній енергії процесу $E_{зв} = 175...180$ Дж/см². Вибір електродних матеріалів (наплавочного дроту, пластин і каналів плавкого мундштука) здійснювали з урахуванням забезпечення технологічної міцності з’єднання та достатньої твердості наплавленого металу. Оскільки сталь JIS SCM4 (аналог – сталь 38ХМА), з якої виготовлена шестерня, відноситься до класу важкозварюваних, щоб уникнути появи гарячих тріщин, запропоновано зменшити вміст вуглецю в наплавленому металі, а також застосовувати попередній підігрів шестерні до 150 °С. У табл. 2 наведені хімічні склади основного та наплавленого металів. Твердість основного металу становила 217 HB, наплавлених зубів – 220...240 HB.

Вивчення структури поперечних макрошліфів наплавлених зубів засвідчило, що наплавлений

Таблиця 2. Хімічний склад основного і наплавленого металу

Матеріал	Вміст хімічних елементів, %								
	C	Mn	Si	Sr	Ni	Mo	Cu	S	P
Основний метал	0,407	0,60	0,26	1,12	0,07	0,23	0,05	0,018	0,017
Наплавлений метал	0,304	0,80	0,68	0,91	0,05	0,03	0,05	0,013	0,019

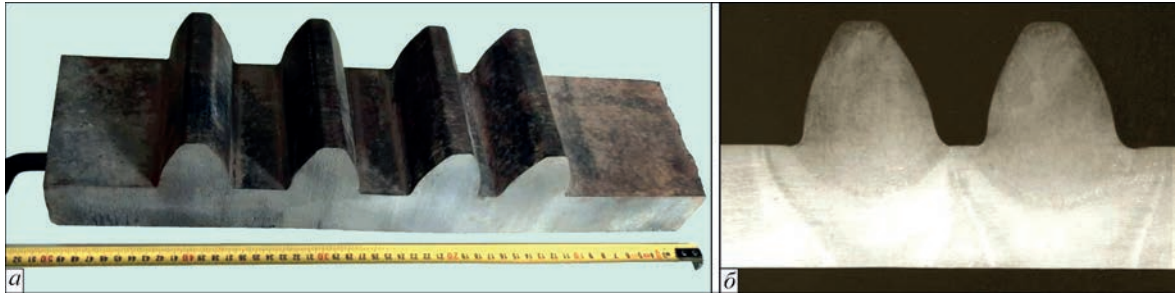


Рис. 3. Зовнішній вигляд (а) і поперечний макрошліф дослідних зразків наплавлених зубів (б)

метал щільний, дефектів у вигляді несплавлення в галтелях, тріщин, пор, неметалевих включень та ін. не виявлено (рис. 3).

Перед початком ремонтних робіт зношені зуби видалили механічним шляхом, залишивши частину незношених ніжок зубів (рис. 4), яким зробили вхідний (100 %) ультразвуковий контроль якості металу. При цьому основна увага приділялася виявленню втомних тріщин [4].



Рис. 4. Зовнішній вигляд шестерні після видалення зношених зубів



Рис. 5. Фрагмент відновлення ЕШН зубів шестерні редуктора повороту платформи гусеничного екскаватора MARION 204-М «Super Front»

З метою зменшення залишкових деформацій наплавку зубів здійснювали системно протилежно, тобто в діаметрально розташованих ділянках наплавлення (рис. 5). По завершенні ЕШН усіх зубів шестерні піддавали загальній відновлювальній термообробці за режимом – нормалізація плюс високий відпуск. Перед посадкою шестерень в електропіч у їхні внутрішні порожнини завантажували карбюризатор. Цей прийом застосували для захисту робочих поверхонь внутрішніх шліців від утворення окалини. Після механічного оброблення прибуткових (торцевих) ділянок (рис. 6) і проведення ультразвукового контролю якості наплавлених зубів відновлені шестерні були встановлені в привод поворотної платформи екскаватора для проведення експлуатаційних випробувань (рис. 7)*.



Рис. 6. Зовнішній вигляд шестерні з наплавленими зубами (а) і після видалення прибуткових ділянок (б)



Рис. 7. Експлуатаційні випробування відновлених шестерень у приводах поворотної платформи екскаватора MARION 204-М «Super Front»

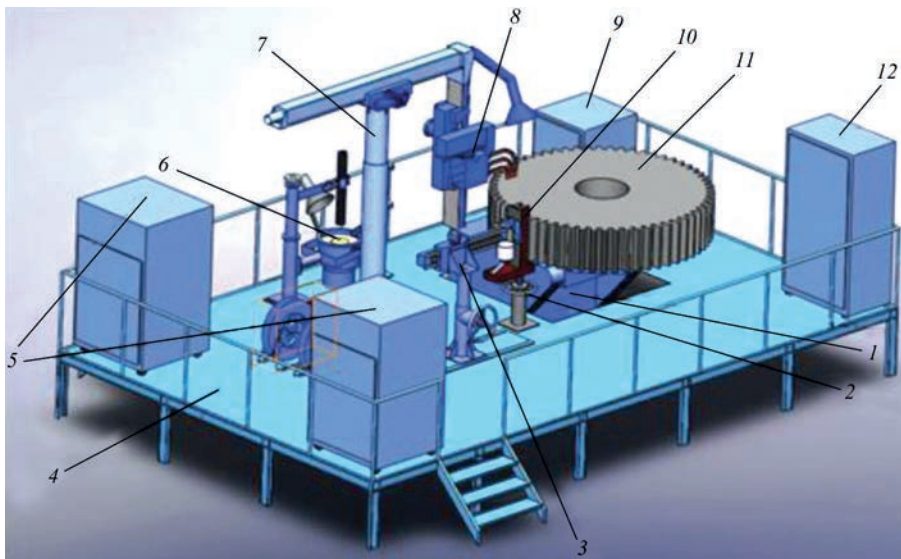


Рис. 8. Склад установки УД 484 УХЛ4 для відновлення ЕШН плавким мундштуком зношених зубів великомодульних шестерень і зубчастих коліс

Досвід експлуатації відновлених шестерень протягом одного року при повному завантаженні ковша екскаватора показав, що їхня робота в реверсивному режимі в умовах значних знакозмінних і контактних навантажень відрізняється достатньою плавністю ходу. Дефектів у вигляді тріщин, відколів тощо не виявлено. Знос робочих поверхонь зубів після одного року експлуатації не перевищує 1,5...3,0 мм, що відповідає характерній величині зносу зубів нових шестерень, придбаних за кордоном. На підставі позитивного досвіду ремонтних робіт розроблено технічне завдання та робочі креслення спеціалізованої дослідно-промислової установки УД 484 УХЛ4 для відновлення зношених зубів великомодульних шестерень (рис. 8).

Установка складається з таких складових частин (рис. 8): обертача типу М 11080, призначеного для встановлення відновлюваної шестерні та повороту її навколо вертикальної осі 1; пристрою кріплення та переміщення піддону водоохолодженого 2; механізму переміщення формувального пристрою 3; естакади 4, джерел живлення 5 типу ВСЖ-1600; пристрою для отримання рідкого флюсу 6; вертикальної колони 7 з горизонтальним висувним кронштейном, на якому кріпиться зварювальний апарат 8 типу А-535, шафи управління зварювальним апаратом 9 і обертачем 12; водоохолоджуваного формувального пристрою 10; шестерні 11, що відновлюється.

Технічні характеристики установки УД 484 УХЛ4

Діаметр електродного дроту, мм.....	3
Кількість електродних дротів, шт.....	1...3
Номинальна напруга та частота мережі живлення.....	380 В, 50 Гц
Зварювальний струм, А.....	300...1250
Діапазон регулювання швидкості подавання електродного дроту, м/год.....	65...480

Горизонтальне переміщення зварювального апарата відносно поверхні, що наплавляється, мм.....	2000
Кут повороту колони, °.....	90 ± 5
Частота обертання обертача, об/хв.....	0,025...1,25
Найбільша вантажопідйомність, кг.....	6300
Розміри відновлюваної шестерні, мм:	
діаметр виступів.....	300...2650
довжина зуба.....	200...500
висота зуба.....	40,5...112,0
Габаритні розміри установки, мм, не більше:	
довжина.....	8000
ширина.....	4000
висота.....	3500

**У роботі брали участь І.А. Імишенецький, Б.В. Цибуленко, С.І. Кулик, Г.Г. Сельчук, В.Є. Гармашов.*

Висновки

1. Вперше було розроблено високопродуктивну технологію, обладнання та спеціальну технологічну оснастку для відновлення за один прохід підчових профілів зношених зубів шестерень приводу повороту платформи кар'єрних екскаваторів MARION 204-М «Super Front» із застосуванням ЕШН.

2. Досвід експлуатаційних випробувань показав, що відновлені шестерні, встановлені в привод повороту платформи екскаватора без механічної обробки робочих поверхонь наплавлених зубів, мають задовільну плавність ходу та стійкість зубів під час роботи в реверсивному режимі в умовах значних знакозмінних і контактних навантажень. Знос зубів на рівні твірного кола після одного року експлуатації не перевищує 1,5...3,0 мм.

3. Розроблено робочі креслення дослідно-промислової установки УД 484 УХЛ4 для відновлення зношених зубів шестерень і зубчастих коліс із застосуванням ЕШН. Установка дає змогу від-

новлювати зношені зуби великомодульних шестерень приводу поворотної платформи кар'єрних гусеничних екскаваторів, підвінцевих шестерень обертових випалювальних печей, трубних млинів, корообдирних барабанів, зубчастих коліс важких механічних пресів тощо.

4. Застосування розробленої технології дозволяє продовжити ресурс експлуатації великогабаритних дорогих шестерень і зубчастих коліс та, відповідно, зменшити закупівлю цих виробів по імпорту.

Список літератури

1. Петров І.В. (1990) *Поточний ремонт і технічне обслуговування будівельних машин*. Київ, Транспорт.
2. Бубновский Б.И., Ефимов В.Н., Морозов В.И. (1991) *Ремонт шагающих экскаваторов. Справочник*. Москва, Недра.
3. (1980) *Excavator 204-M «Super Front». Operating instructions «Sumitomo Marion Corporation»* (Japan–USA).
4. Сушук-Слюсаренко І.І., Лычко І.І., Козулин М.Г., Семенов В.М. (1989) *Электрошлаковая сварка и наплавка в ремонтных работах*. Киев, Наукова думка.
5. Артамонов В.Л., Сушук-Слюсаренко І.І. (1988) *Электрошлаковая наплавка (обзор)*. *Автоматическая сварка*, **11**, 41–47.
6. Кусков Ю.М., Рябцев І.О. (2022) *Электрошлакове наплавлення. Матеріали, технології, обладнання*. Монографія. Під заг. ред. І.О. Рябцева. Київ, Інтерсервіс.
7. Козулин С.М., Подыма Г.С. (2021) *Устройство для восстановления эвольвентных профилей зубьев крупномодульных шестерен. Збірка доповідей X Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених»*, Вип. 10. Київ, ДІА, сс. 16–21.

8. Kozulin, S.M., Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I. (2006) Effect of ESC parameters on quality of restored gear teeth. *The Paton Welding J.*, **9**, 47–49.
9. Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Kovalchuk, S.S. et al. (2021) Restoration of worn helical coarse pitch gears by electroslag cladding. *The Paton Welding J.*, **6**, 41–47. DOI: <http://doi.org/10.37434/tpwj2021.06.07>

References

1. Petrov, I.V. (1990) *Current repairs and maintenance of construction machines*. Kyiv, Transport [in Ukrainian].
2. Bubnovskiy, B.I., Efimov, V.N., Morozov, V.I. (1991) *Repair of walking excavators*. In: *Refer. Book*. Moscow, Nedra [in Russian].
3. (1980) *Excavator 204-M «Super Front». Operating instructions Sumitomo Marion Corporation*, Japan–USA.
4. Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I., Kozulin, M.G., Semenov, V.M. (1989) *Electroslag welding and surfacing in repair work*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
5. Artamonov, V.L., Sushchuk-Slyusarenko, I.I. (1988) Electroslag surfacing (Review). *Avtomaticheskaya Svarka*, **11**, 41–47 [in Russian].
6. Kuskov, Y.M., Ryabtsev, I.O. (2022) *Electroslag surfacing. Materials, technologies, equipment. Monograph*. Ed. by I.O. Ryabtsev. Kyiv, Interservice [in Ukrainian].
7. Kozulin, S.M., Podyma, G.S. (2021) Device for restoring involute profiles of teeth of large-module gears. In: *Reports of the Xth All-Ukrainian Sci. and Pract. Conf. of Students, Postgraduates and Young Scientists on Applied Geometry, Design, Intellectual Property Objects and Innovative Activities of Students and Young Scientists*, Issue 10, Kyiv, DIYA, 16–21 [in Russian].
8. Kozulin, S.M., Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I. (2006) Effect of ESC parameters on quality of restored gear teeth. *The Paton Welding J.*, **9**, 47–49.
9. Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Kovalchuk, S.S., Podyma, G.S., Lazarchuk, M.V. (2021) Restoration of worn helical coarse pitch gears by electroslag cladding. *The Paton Welding J.*, **6**, 41–47. DOI: <http://doi.org/10.37434/tpwj2021.06.07>

RESTORATION OF WORN GEARS OF A QUARRY EXCAVATOR BY ELECTROSLAG SURFACING

S.M. Kozulin¹, A.A. Fomakin¹, R.N. Mishchenko¹, L.M. Petrenko²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: s.m.kozulin@gmail.com

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding. 9 Heroes of Ukraine Ave., 54007, Mykolayiv, Ukraine.

E-mail: university@nuos.edu.ua

The results of experimental research carried out with the aim of developing a high-performance technology, equipment and special technological fixtures for restoring the pitch profile of worn teeth of the drive gears of the rotary platform of MARION 204-M «Super Front» quarry excavators by electroslag surfacing (ESS) are presented. A design of special water-cooled forming equipment was developed that eliminates the need for machining the working profiles of the teeth after their surfacing. A laboratory surfacing installation was designed and manufactured. A search for ESS modes was performed that provide guaranteed fusion of the filler metal with the base, as well as high-quality formation of the working surfaces of the surfaced teeth; restoration by ESS of worn teeth of experimental and standard gears; assessment of the operability of the restored gears according to the results of operational tests. Working drawings of an experimental and industrial specialized installation for restoring worn teeth of drive gears and gearwheels were developed. To implement the technology of restoration repair, a serial A-535 UHL4 system with an alternating current TShS 1000-3 power source was used. The material from which the drive gears of the excavator platform gearboxes are made is high-strength structural steel JIS SCM4. Serial welding wires of Sv 30KhGSA grade and AN-8 fused flux were used as welding materials. The experience of operational tests has shown that the restored gears have good smoothness and stability of the teeth during operation in the reverse mode under the conditions of significant alternating and contact loads. The wear of the teeth at the level of the generatrix does not exceed 1.5...3 mm. Working drawings of the experimental and industrial UD 484 UHL4 installation for the restoration of worn teeth of gears and gear wheels using ESS have been developed. 9 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: restoration, gears, tooth pitch profile, wear, electroslag surfacing, consumable nozzle, forming equipment, fusion quality, surfacing installation, heat treatment, operational testing

Отримано 06.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 16.06.2025

Прийнято 07.10.2025

ПАМ'ЯТІ ВАЛЕРІЯ МИКОЛАЙОВИЧА ШЛЕПАКОВА



17 серпня 2025 р. на 87-у році після важкої хвороби пішов з життя Валерій Миколайович Шлепаков – відомий український вчений у галузі металургії й технології металів, матеріалознавства, електрозварювання, лауреат Державної премії СРСР, Премії

Ради Міністрів СРСР, Премії ім. І. К. Походні НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

В.М. Шлепаков народився 11 листопада 1938 р. у Харкові. У 1955 р. вступив до Київського політехнічного інституту, а в 1960 р. закінчив за спеціальністю «Устаткування та технологія зварювального виробництва».

Після закінчення Київського політехнічного інституту більше шестидесяти років свого життя Валерій Миколайович присвятив роботі в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона. За цей час він пройшов шлях від інженера до добре відомого у світі фахівця в галузі металургії зварювання та зварювальних матеріалів. У 1970 р. В.М. Шлепаков захистив кандидатську дисертацію, а у 1988 р. – докторську.

Узагальнені в цих дисертаціях фундаментальні дослідження закономірностей кінетики плавлення та переносу електродного металу, розподілу температури у зварювальній ванні й краплях електродного металу, процесів взаємодії між газовою і шлаковою фазами та розплавленим металом, взаємодії в системі «склад-структура-властивості» стосовно металу зварних швів стали великим внеском у теорію зварювальних процесів і здобули світове визнання. Власні експериментальні результати, отримані В.М. Шлепаковим у галузі дослідження фізико-хімічних процесів у зварювальній дузі слугували теоретичною базою створення багатьох марок порошкових дротів для дугового зварювання. За його участі були розроблені промислові технології виготовлення порошкових дротів, побудовані та модернізовані цехи для їх виробництва в Україні та за кордоном, що дозволило забезпечити потреби підприємств України та країн близького зарубіжжя в цих матеріалах при виготовленні зварних металоконструкцій з вуглецевих і низьколегованих сталей.

Оригінальні розробки самозахисних порошкових дротів двошарової конструкції, а також порошкових дротів для дугового зварювання в середовищі захисних газів були запатентовані в багатьох країнах світу. Ліцензії на виробництво таких дротів були придбані провідними фірмами й компанія-

ми-виробниками зварювальних матеріалів у США, Німеччині, Франції, Японії, Аргентині, Китаї та у ряді інших країн. Роботи, виконані за активної участі Валерія Миколайовича, отримали високу оцінку в нашій країні та у світі. У 1975 р. самозахисний порошковий дріт двошарової конструкції був визнаний гідним Золотої медалі на виставці «Зварювання-75» у м. Брно. У 1978 р. «За створення, організацію масового виробництва й впровадження нових матеріалів (порошкових дротів) для механізованого зварювання, що забезпечують підвищення продуктивності праці та якості зварних конструкцій» В.М. Шлепакову, як учаснику колективу дослідників та розробників ІЕЗ ім. Є.О. Патона, було присуджено Державну премію СРСР у галузі науки й техніки. У 1983 р. робота «Комплекс досліджень, проектно-конструкторських і технологічних робіт зі створення й впровадження прогресивної технології дугового зварювання й устаткування (комплекс «Стик») для технічного переозброєння зварювального виробництва при спорудженні магістральних трубопроводів», у якій брав активну участь В.М. Шлепаков, отримала премію Ради Міністрів СРСР, а в 1985 р. ця робота була відзначена Золотою медаллю Лейпцігського ярмарку. У 2017 р. за цикл робіт «Високоєфективні зварювальні матеріали з покращеними санітарно-гігієнічними показниками для зварювання сучасних високоміцних низьколегованих сталей» колективу науковців, серед яких був В.М. Шлепаков, присуджено премію ім. І.К. Походні НАН України.

Результати фундаментальних досліджень кінетики процесів формування газового та шлакового захисту розплавленого металу при нагріванні й плавленні порошкових дротів, взаємодії металу з газами, досліджень структури та властивостей металу зварних швів при комплексному легуванні дозволили зробити значний внесок у теорію й практику електродугового зварювання. В.М. Шлепаков є автором більше як 200 наукових праць, серед яких 9 монографій та 85 патентів. Усі ці публікації заслужено здобули науковий авторитет і повагу фахівців різних галузей в багатьох країнах.

Валерій Миколайович був досвідченим дослідником, високоосвіченою інтелігентною людиною, яка радо ділилася своїми енциклопедичними знаннями та яку щиро поважали й любили колеги, друзі й усі, хто знав його по роботі й у побуті.

Відхід Валерія Миколайовича Шлепакова – важка втрата для науки.

Колектив співробітників відділу
«Дослідження фізико-хімічних процесів
у зварювальній ванні» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

ВИБУХ ЗВАРЮЄ І РОЗРІЗАЄ МЕТАЛ

У другій половині ХХ століття різко збільшується обсяг застосування алюмінієвих і титанових сплавів в якості конструкційних матеріалів. Основною причиною став перехід техніки на екстремальні умови експлуатації. Зварні з'єднання повинні були витримувати значні динамічні навантаження, екстремально низькі та високі температури, агресивні середовища тощо. Частина вузлів машин, апаратів і багатьох інших конструкцій працювали в різних умовах і необхідно було виготовляти їх із металів і сплавів, властивості яких між собою відрізняються. Виникла проблема зварювання різнорідних металів. Найбільшим попитом користувалися вироби з наступних пар металів та їх сплавів: алюміній-титан, титан-сталь, сталь-алюміній. Відомо, що при їх поєднанні методами зварювання плавленням утворювалися інтерметаліди з неприпустимими експлуатаційними властивостями (крихкістю, тріщинами та т.п.). З усього спектру способів зварювання найефективнішою технологією, яка вирішила завдання з'єднання цих металів, виявилось зварювання вибухом (ЗВ). Його розробили на базі результатів досліджень з керування горінням і вибухом, кумулятивного ефекту та теорії пластичності.

У СРСР в 1925–1926 рр. вивченням вибухових речовин (ВР) займався М.Я. Сухаревський. Дослідженням порохових ВР приділяли увагу при розробці бойових ракет. Інтенсивні дослідження впливу ВР розгорнулися у зв'язку з роботами зі створення атомних бомб. У створенні перших атомних бомб у США брав участь завідувач відділу розробки вибухових речовин у Лос-Аламосі Г.В. Кістяківський (народився у м. Боярка, Київський повіт, Київська губернія, радник президента Д. Ейзенхауера у справах науки і техніки, 1959–1961 рр.). Його основний внесок полягав у створенні вибухівки «боратол» – детонатора, який забезпечив точний і потужний імпульс для ініціювання ланцюгової реакції в плутонієвій бомбі. У 1938 р. завідувач лабораторії в Інституті хімічної фізики Я.Б. Зельдович зробив значний внесок у теорію горіння та вибуху, а також запропонував модель плоскої детонації. Виникла область фізики та фізикохімії високих температур. У 1941 р. Я.Б. Зельдович розрахував внутрішню балістику реактивного снаряда установки «Катюша». Його праці з фізики вибуху, детонації та ударних хвиль і ядерної фізики були використані при створенні атомної (1949 р.) і водневої бомб (1953 р.) у СРСР.

В історії техніки, військової та вибухової справи були випадки, коли утворювалися з'єднання куль і снарядів з металевими тілами при їх зіткненні, які за своєю природою розцінювалися як чисто механічні. У 1792 р. гірський інженер Франц фон Баадер висловив припущення, що енергію вибуху можна сконцентрувати на невеликій площі, використовуючи пустотілий заряд. Однак у своїх експериментах Баадер використав чорний порох, який не може формувати необхідну хвилю детонації. Вперше продемонструвати ефект застосування пустотілого заряду вдалося лише з винаходом високобризантних ВР. Це зробив у 1883 р. Макс фон Ферстер. У 1888 р. у США кумулятивний ефект досліджував та описав Чарльз Манро. У 1938 р. Франц Томанек у Німеччині та Генрі Мохоупт у Швейцарії незалежно один від одного відкрили ефект збільшення пробивної здатності при застосуванні металевого облицювання конуса, на зовнішній поверхні якого розташовано шар ВР. Кумулятивний ефект – ефект Манро почали використовувати у дослідницьких цілях (можливість досягнення великих швидкостей речовини – до 90 км/с), у гірській справі, у військовій справі (бронебійні снаряди).

У 1941–1943 рр. співробітники Інституту математики АН УРСР під час евакуації до Уфи під керівництвом М.О. Лаврентьєва вивчали дію на перешкоду металевого стрижня, що рухається з великою швидкістю вздовж осі. Цим передбачається, по суті, ідея кумулятивної дії вибуху, теорією якого М.О. Лаврентьєв впритул зайнявся після повернення до м. Києва. Він запропонував оригінальне гідродинамічне трактування явища кумуляції, відповідно до якого при величезних тисках,



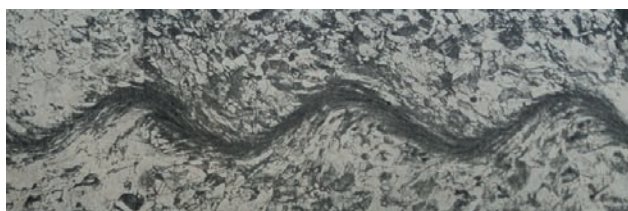
У демонстраційній залі ІЕЗ, 1986 р., зліва направо: Б.О. Мовчан, В.М. Бернадський, О.М. Корніснко, Я.Б. Зельдович, Д.А. Дудко, Б.С. Патон

що виникають у момент вибуху, метал можна розглядати як ідеальну рідину, яка не стискається; після цього, використовуючи рівняння гідродинаміки, можна було розрахувати динаміку струменя та обчислити пробивний ефект.

Утворення нероз'ємних з'єднань металів при ударі, викликаному вибухом, встановили одночасно незалежно в УРСР і США. У 1944 р. в американському журналі Л.Р. Карл описав випадок з'єднання двох латунних дисків, що метаються за допомогою детонатора. У 1944–1946 рр. М.О. Лаврент'єв та його співробітники в Інституті математики АН УРСР у м. Києві при проведенні експериментів з кумуляції отримали перші зразки з'єднання – монолітні стрижні з пучків мідних дротів, осесиметричні та біметалеві зразки з характерним для зварювання вибухом явищем хвилеутворення на поверхні контакту тіл, що стикаються.

Учасник цих робіт М.М. Ситий зварював монолітні стрижні з пучків мідного дроту, обмотуючи їх шнуром, що детонував. У 1950 р. у США Г. Кован і Дж. Дуглас дослідили косі зіткнення пластин і розробили першу практичну технологію зварювання вибухом. У 1958 р. в Інституті гідродинаміки Сибірського відділення АН СРСР (м. Новосибірськ) продовжено дослідження в напрямку металообробки вибухом (М.О. Лаврент'єв, Ю.І. Фадеєнко).

У 1950-х роках розвиток і широке впровадження технології штампування вибухом надало можливість застосування вибухових речовин для з'єднання металів. У ці ж роки Г. Кован, А. Хольцман і Дж. Дуглас з американської фірми «Дюпон Де Не-



Ефект явища хвилеутворення при зварюванні вибухом



Зварний зразок з хвильовою поверхнею

мур» у результаті досліджень косих зіткнень пластин, що металися плоским зарядом ВР, розробили досконалу технологію зварювання вибухом, яка була запатентована та опублікована тільки в 1964 р.

У СРСР системні дослідження процесу ЗВ розгорнуто на початку 1960-х років, зокрема в Інституті гідродинаміки. Надалі науково-дослідні роботи зі ЗВ проводилися в ІЕЗ ім. Є.О. Патона (ІЕЗ), у Дніпропетровському гірничому інституті, у Волгоградському політехнічному інституті, у Всесоюзному науково-дослідному та конструкторсько-технологічному інституті трубної промисловості (ВНДКТП) (м. Дніпропетровськ) та ін.

Для отримання належного зварного з'єднання необхідно було навчитися керувати локальним вибухом, визначити склад ВР, технології підготовки кромки і поверхонь перед зварюванням, геометрію розташування елементів (листи, труби, стрижні), що зварюються, і шару ВР на їх поверхнях, особливості з'єднання різних металів, вирішити проблему техніки безпеки при проведенні вибухових робіт. В ІЕЗ розпочато інтенсивний пошук методів зварювання різномірних металів. «Протокол наради у директора ІЕЗ від 03 жовтня 1964 р. № 548. «Про виконання та подальший розвиток в ІЕЗ робіт зі зварювання різномірних матеріалів. Вирішили: Відзначити, що розвиток хімічного машинобудування, атомної енергетики та інших галузей техніки висунув актуальне завдання створення основ зварювання конструкцій та виробів із різномірних металів. Вважати однією з найважливіших тем, які мають розроблятися у технологічних відділах ІЕЗ».

Роботи зі створення лабораторії зварювання вибухом в ІЕЗ розпочав М.Г. Остапенко. З 1967 р. лабораторією, а з 1972 р. – відділом зварювання, різання та обробки металів вибухом почав керувати д.т.н. В.М. Кудінов. У 1980–2003 рр. цей відділ очолював д.т.н. В.Г. Петушков.

В ІЕЗ було досліджене явище хвилеутворення на поверхні з'єднання вибухом – з'єднання у формі хвиль, розглянуто питання формування руйнівних залишкових напружень при ЗВ і методи боротьби з ними, розроблено пружнопластичну модель хвилеутворення, що дозволяла врахувати індивідуальні властивості ЗВ різних металів і сплавів. Було розроблено промислові технології обробки вибухом зварних з'єднань металоконструкцій відповідального призначення для забезпечення їх експлуатаційної надійності (В.М. Кудінов, В.Г. Петушков). У Дніпропетровському гірничому інституті та ВНДКТП трубної промисловості досліджували та розробляли технологічні процеси зварювання, зміцнення й отримання нових мате-

ріалів за допомогою вибуху. (Р.П. Дідик, М.П. Юрченко, Ю.В. Гаєк та ін.).

Під керівництвом В.М. Кудінова проведено фундаментальні дослідження зварювання та плакування вибухом, у тому числі, досліджено структури з'єднань, розглянуто теплову ситуацію в зоні утворення з'єднання; проаналізовано причини, що призводять до руйнування вже створених з'єднань, для чого досліджено процеси виникнення та взаємодії хвиль навантаження–розвантаження, а також роль залишкового тиску продуктів детонації. Було запропоновано нову модель фізичної теорії явища хвилеутворення. Комплекс досліджень, виконаних в ІЕЗ, став основою виділення окремого класу зварювальних процесів, які отримали назву конструкційного ЗВ, що виконується на деталях і виробках.

Спочатку для ЗВ використовувалися високобризантні ВР з високою швидкістю детонації, які зазвичай застосовувалися в кумулятивних зарядах і для створення сильних ударних хвиль. У цих умовах зварювання між пластинами спостерігалось лише у певному діапазоні початкових кутів і незмінно супроводжувалося значною залишковою деформацією поверхневих шарів металу з характерною хвилеподібною формою.

Особливим досягненням слід вважати створення подовжених зарядів (ПЗ), розроблення безпечної технології їх виготовлення та застосування для зварювання і різання металевих конструкцій.

У 1960–1970-х роках в ІЕЗ розроблено способи локального та шовного зварювання еквідистантно розташованих тонкостінних деталей, листів і замкнутих оболонок за допомогою подовжених зарядів, які начинені ВР з високою швидкістю детонації. На основі цих способів створено промислову технологію зварювання вибухом алюмінієвих оболонок кабелів зв'язку, яка відразу ж була впроваджена при будівництві кабельних ліній зв'язку загальною довжиною понад 5000 км. ЗВ застосовувалось для з'єднання потужних струмопроводів і струмопровідних елементів. Розроблено та впроваджено на Південно-Західній залізниці та інших 12 залізницях СРСР кілька ефективних способів з'єднання багатожильної арматури контактних мереж і технологію приварювання мідних з'єднувачів до об'ємно-загартованих рейок.

З 1970-х років посилюються дослідження фізико-механічних явищ при обробці металів вибухом, включаючи зварювання й різання, зміну їх фізико-механічних властивостей. Розроблено теорію й промислові технології обробки вибухом зварних з'єднань металоконструкцій відповідального

призначення для забезпечення їх експлуатаційної надійності, зокрема для підвищення корозійно-механічної міцності зварних з'єднань в основних і кислих середовищах (В.М. Кудінов, В.Г. Петушков). За допомогою ЗВ плоских поверхонь одержують біметалеві та багатошарові листи, здійснюють плакування спеціальними сплавами великогабаритних виробів (лопатеї гідротурбін, конструктивних елементів реакторів тощо), з'єднують елементи металевих конструкцій.

У 1979 р. досліджено механізм детонації великомасштабних зарядів вибухової речовини стосовно плакування зварюванням вибухом. Встановлено пульсуючий режим детонації, запропоновано способи стабілізації процесу детонації. Розроблено технологію приєднання відводів до діючих магістральних газопроводів із використанням біметалічного перехідника (В.М. Кудінов). Вивчено умови утворення з'єднань поблизу нижньої межі ЗВ. Результати цих досліджень використовуються для розробки технологічних режимів ЗВ, які мінімізують вплив ЗВ при зварюванні елементів готових металоконструкцій, які чутливі до рівня залишкових пластичних деформацій та піддаються ризику руйнування. Визначено вплив відмінностей густини та твердості при з'єднанні різнорідних матеріалів. Вивчено вплив шорсткості поверхонь, що з'єднуються, і сформульовані рекомендації щодо раціонального вибору ступеня чистоти їх механічної обробки. Відпрацьовано прийоми хімічної підготовки поверхонь, що з'єднуються, при зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів зі зниженою здатністю до високошвидкісного пластичного деформування. Показано, що попередня хімічна обробка дозволяє з'єднувати ці сплави безпосередньо, без проміжних прошарків із більш пластичного металу.

Високими техніко-економічними показниками відрізняється технологія ЗВ сталеалюмінієвих перехідників для анодотримачів електролізерів для виплавки алюмінію. За допомогою цієї технології на Усольському заводі гірничого обладнання безпосередньо в цехових умовах організовано великосерійне виробництво сталеалюмінієвих перехідників. Завдяки застосуванню механізованої вибухової камери, технологічний цикл зварювання вибухом одного виробу становить 5 хв. На Красноярському алюмінієвому заводі організовано відкриту вибухову ділянку реставрації сталеалюмінієвих анодотримачів продуктивністю 10 тис. штирів на рік.

Прикладом ефективного застосування зварювання та різання вибухом є комбінована технологія під'єднання відводів до газопроводів під тиском, що забезпечує безпечне проведення робіт без припи-

нення транспортування газу. Зварювання та різання вибухом може здійснюватися в польових умовах, де складно застосовувати інше стандартне або громіздке устаткування. Здійснюється з'єднання в польових умовах приводів і вузлів контактної мережі, алюмінієвих кабелів, струмопідводів та ін. деталей.

У 1980-х роках розроблено принципово нові технологічні схеми та конструкції оснастки, що забезпечують локальне плакування вибухом оболонок у будь-яких просторових положеннях. Розроблено технологію ремонту локальних пошкоджень – наскрізних отворів з тонкими стінками (В.М. Кудінов та ін.).

У 1970–1980-х рр. Дослідне виробництво СКТБ ІЕЗ виготовило та поставило на адресу підприємств нафтової та газової промисловості (Ташкентська, Тюменська та Куйбишевська обл., Чорнобильська АЕС) подовжені кумулятивні заряди (ПКЗ) для різання вибухом трубопроводів та ін. конструкцій. Для виготовлення вузлів ракетних двигунів, систем подачі палива, аеродинамічних систем керування, перехідних відсіків та ін. вузлів із біметалу на Південному машинобудівному заводі було створено спеціальний цех. В ІЕЗ виготовлені підводні заряди для різання конструкцій глибоководних стаціонарних платформ при установці їх на акваторії Каспійського моря на глибині 120 м.

У 1979 р. при ІЕЗ створено Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з металообробки вибухом, нині – Науково-інженерний центр «Металообробка вибухом» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України – НІЦ МВ, яке очолив Л.О. Волгін. НІЦ

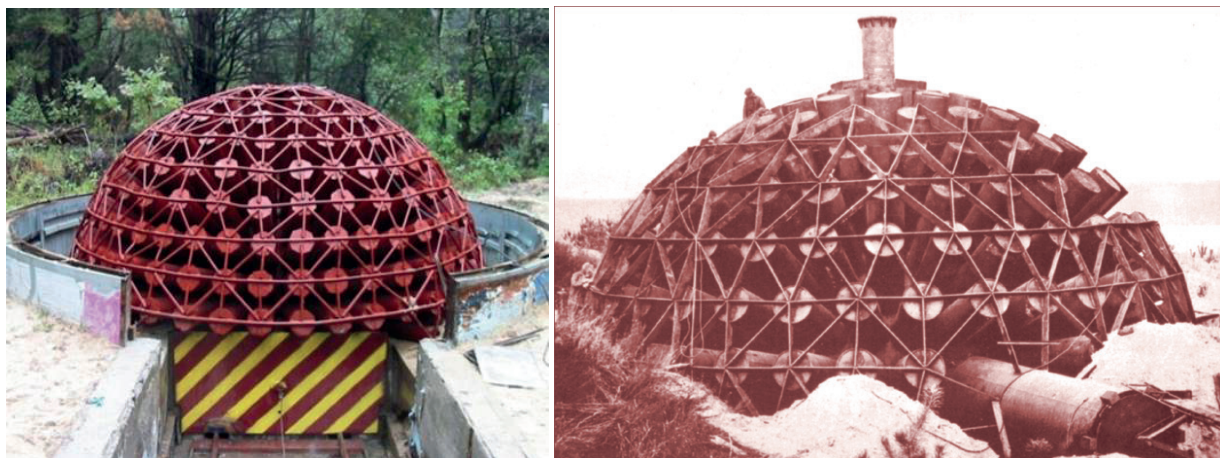
МВ по праву відносять до наукових об'єктів, що становлять національне надбання України.

Найважливішими роботами, виконаними Л.О. Волгіним і під його керівництвом, є: розробка технології зварювання вибухом триметалевих перехідників для аерокосмічної техніки; розробка труборізів на основі ПКЗ для демонтажу нафтопроводів, для вирізки ділянки труби з нафтопроводу в аварійній ситуації, для підключення відводів до діючих нафто- і газопроводів, для демонтажу під водою морських стаціонарних платформ тощо. Розроблено та впроваджено системи для аварійного відділення лопатей вертольота при катапультуванні екіпажу, для руйнування скління кабін пілота при покиданні екіпажем літальних апаратів у аварійних ситуаціях, для екстреного відокремлення «чорного ящика» від літального апарата у випадку аварії, а також технології для утворення аварійних виходів у космічному кораблі багаторазового використання в комплексній системі аварійного порятунку екіпажу. Спільно з Міністерством цивільної авіації та Київським авіаційним заводом ім. О.К. Антонова розроблено бортові пристрої та технологію застосування ВР для руйнування скління кабіни літальних апаратів і для утворення аварійних виходів у літаках різних типів (враховувався допустимий фізіологічний рівень звукового імпульсу шуму 150 Дб).

З 1990-х років одним з основних напрямків наукової діяльності ІЕЗ було підвищення циклічної довговічності зварних з'єднань обробкою вибухом. Було розроблено уявлення про механізм впли-



Стандартні кумулятивні заряди (лінійний та кільцевий) та перфоратор для нафтогазової промисловості



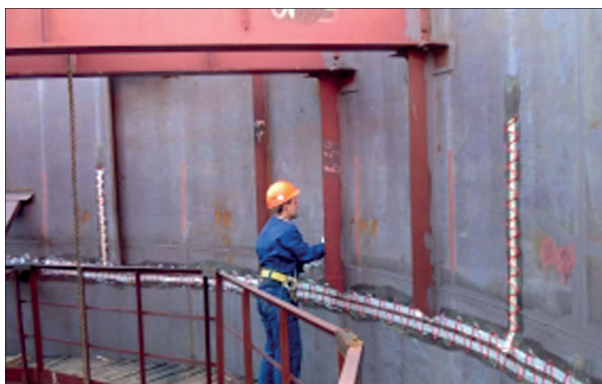
Камери для виконання робіт за технологіями ЗВ; праворуч – трубчаста камера потужністю 200 кг тротилу

ву обробки вибухом на довговічність зварних з'єднань, способи призначення режимів обробки та їх практичної реалізації (В.О. Титов). Технологія обробки зварних з'єднань вибухом успішно використовувалась при виготовленні прогінних споруд, ободів коліс великовантажних самоскидів Белаз, поворотного механізму радіотелескопа з діаметром дзеркала 70 м, при усуненні дефектів форми резервуарів для нафтопродуктів тощо.

У 1999–2003 рр. виявлено явище різкого зниження схильності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву В95 до крихких руйнувань в умовах низькотемпературного підігріву, що дало можливість виконати плакування вибухом зварних з'єднань з тріщиноподібним концентратором (В.Г. Петушков). У 2008 р. виявлено ефект запобігання розтріскуванню та покращенню зварюваності при зварюванні вибухом високовуглецевих сталей підвищеної твердості (наприклад 65Г) з різними металами та сплавами з використанням низькотемпературного (до 150 °С) попереднього підігріву. Цей ефект дозволяє за допомогою ЗВ отримувати з'єднання металів і сплавів, які мають низьку пластичність (Л.Д. Добрушин).

ЗВ застосовують при виготовленні трубних дощок теплообмінників і трубчастих перехідників для енергетики та ракетобудування. Корпуси парогенераторів виготовляють із перлітних сталей, а трубки та колектори – із аустенітної корозійностійкої сталі. Для виготовлення складних конструкцій цих вузлів АЕС розроблено технології вибухового розвальцювання та наступного приварювання дугою в інертних газах.

Протягом багатьох років в ІЕЗ займалися проблемами безпеки та екологічної чистоти вибухових технологій. Було розроблено декілька конструкцій вибухових камер. ЗВ виконують у пристосованих звукопоглинаючих приміщеннях (на майданчиках, у басейнах, камерах) або під піною в певному діапазоні швидкостей і кутів співударяння. У НІЦ МВ діє вибухова камера, в якій проводяться



Робочий момент обробки вибухом декомпозера

вибухові роботи та яка розрахована на підрив до 200 кг ВР у тротиловому еквіваленті. У ній можна виготовляти біметалеві вироби різних габаритів і конфігурації (В.М. Кудінов, В.Г. Петушков, Л.О. Волгін). Як вибухову речовину найчастіше застосовують амоніти, амонали, гранулотол тощо.

У 2011 р. в ІЕЗ розроблено технологію квазістикового ЗВ трубок із мідного сплаву CuCrZr та нержавкої сталі 321 для виготовлення біметалічного перехідника, що дозволяє з'єднувати різнорідні матеріали за допомогою зварювання плавленням (Л.Д. Добрушин, С.Ю. Ілларіонов, П.С. Шльонський). Дана технологія розроблялась для проекту «Міжнародний експериментальний термоядерний реактор», так званий ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

Пізніше, у 2014–2016 рр., в ІЕЗ було розроблено конструкцію і технологію виготовлення за допомогою ЗВ триметалевого перехідника Ti-SS-Ti. Всередині цього перехідника робився отвір, в який вварювали за допомогою електронно-променевого зварювання патрубків із ніобію. Таким чином вдалося з'єднати резонатор із ніобію з кожухом із нержавкої сталі для проекту «Міжнародний лінійний колайдер», або скорочено ILC (International Linear Collider); виконавці – С.Ю. Ілларіонов, П.С. Шльонський, А.Г. Бризгалін.

1. US patent 3137937, Cowan, George R.; Douglass, John J.; Holtzman, Arnold H., Explosive bonding, issued 1964-06-23
2. Кудінов В.М. (1971) Гидродинамическое моделирование процесса образования волн при сварке металлов взрывом. *Автоматическая сварка*, **8**, 71–76.
3. Кудінов В.М. (1978) *Сварка взрывом в металлургии*. М., Металлургия.
4. Дерibas А.А. (1972) *Физика упрочнения и сварки взрывом*. Новосибирск.
5. Волгін Л.А. (1980) *Способы и технологические средства замены поврежденных участков магистральных трубопроводов*. М., ЭНГ.
6. Кудінов В.М., Петушков В.Г., Фадеев Ю.И. (1993) *Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций*. М., Металлургия.
7. Петушков В.Г. (2005) *Применение взрыва в сварочной технике*. К., Наукова думка.
8. Добрушин Л.Д., Корнієнко О.М. (2010) *Зварювання вибухом* / Енциклопедія сучасної України [Електронний ресурс] / редкол.: І.М. Дзюба [та ін.]; НАН України, НТШ. Київ, Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, Т. 10. ISBN 978-966-02-5721-4.
9. Шмиг Р.А., Боярчук В.М., Добрянський І.М., Барабаш В.М. (2010) *Зварювання вибухом. Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури*. За заг. ред. Р.А. Шмига. Львів, ISBN 978-966-7407-83-4.

Олександр Корнієнко, д.і.н.,

ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Леонід Полонський, д.т.н.,

Державний університет «Житомирська політехніка»



Fronius Fortis: зварювання MIG/MAG нового покоління — гнучке, функціональне, потужне

«Наша нова серія зварювальних апаратів Fortis – це надзвичайно універсальне рішення для високоякісного ручного зварювання MIG/MAG. Ми спеціально розробили її з урахуванням різноманітних вимог малих і середніх підприємств», – підкреслює Петер Фроніус, керівник відділу системних рішень компанії Fronius International. «Fortis поєднує в собі надійну технологію, інтуїтивно зрозуміле керування та максимальну функціональність, встановлюючи нові стандарти у металообробній промисловості». Нові зварювальні апарати серії Fortis вперше були представлені у вересні 2025 р. на виставках «FABTECH» у Чикаго (США) та «SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» в Ессені (Німеччина).

Одна серія – безліч варіантів. Асортимент продукції Fortis містить потужні зварювальні апарати в діапазоні струму 270...500 А, доступні як у вигляді компактних універсальних систем «все в одному», так і у розділеному виконанні із зовнішнім механізмом подачі дроту для значного розширення робочого діапазону. Всі моделі можуть бути оснащені перевіреними функціями Fronius, такими як імпульсне зварювання, SynchroPulse, інтервальне зварювання, прихватка TAC, HotStart та Anti-Stick.

Лінійку доповнює Fortis XT – енергоефективний універсальний апарат для трифазної мережі з напругою 200...600 В та однофазної мережі з максимальним зварювальним струмом до 320 А, у тому числі й режим CEL. Тому він ідеальний для використання в усьому світі, економить енергію завдяки вищому коефіцієнту потужності та пропонує додаткову, вищу вихідну характеристику для ще більшої продуктивності зварювання.

Завершує лінійку модель Fortis Duo. Вона поєднує в собі компактний зварювальний апарат і додатковий зовнішній механізм подачі дроту, що дозволяє використовувати дві котушки дроту і два зварювальні пальники в одному пристрої. «Це означає, що зварник може без переоснащення, лише натисканням кнопки, легко переходити з одного матеріалу або діаметру дроту на інший» – пояснює Міхаель Айстерхубер, менеджер з продуктової лінійки Fronius International. «Це економить

величезну кількість часу, що ідеально підходить для завдань, які часто змінюються, насамперед, у контрактному виробництві, будівництві металевих конструкцій або монтажі».

Розроблений для гнучкого використання. На багатьох підприємствах зварювальні завдання змінюються майже щодня: нові матеріали, різні форми швів та різноманітні деталі. Саме для такого динамічного середовища створений Fronius Fortis. Завдяки майже 240 оптимізованим характеристикам, розробленим спеціально для сталі, нержавкої сталі та алюмінію, він забезпечує стабільно надійні результати навіть у складних умовах, таких як зварювання вертикальних швів знизу вгору, корневих проходів та з'єднання тонких листів.

Multiprocess – один пристрій для різних процесів. MIG/MAG, TIG чи MMA: усі варіанти Fortis потужністю до 500 А з функцією Multiprocess доступні та охоплюють усі поширені зварювальні процеси на найвищому рівні. «Завдяки функції Multiprocess, Fortis є не лише універсальним, але й орієнтованим на майбутнє. Це означає, що він оснащений для будь-яких майбутніх завдань, які, можливо, ще невідомі сьогодні», – зазначає Петер Фроніус. «Тому це – ідеальне та надзвичайно гнучке рішення для підприємств з широким спектром застосувань».

Інтуїтивне управління, включаючи майстер параметрів зварювання. «Центральним елементом серії Fortis є наша повністю переосмислена



Ручне зварювання MIG/MAG останнього покоління за допомогою потужного, гнучкого та повністю цифрового апарату Fronius Fortis. Однофазний, трифазний або в режимі генератора: новий потужний апарат завжди забезпечує високу якість зварювання в будь-якій точці світу



Модель Fortis із зовнішнім механізмом подачі дроту забезпечує максимальний робочий діапазон із з'єднувальним шланговим пакетом довжиною до 20 м. До того ж, функція Pulse може застосовуватися зі з'єднувальними шланговими пакетами до 15 м



Fortis Duo поєднує в собі компактний зварювальний апарат 320...500 А і додатковий зовнішній механізм подачі дроту. Це означає, що зварник має під рукою два різних матеріали або товщини дроту на одному пристрої, що економить час на зміну процесу при частому переході від одного завдання до іншого



Нова лінійка продуктів Fortis (270...500 А) пропонує відповідну модель для будь-яких вимог: у вигляді компактної системи «все в одному», в яку також можна інтегрувати рідинне охолодження для економії місця, або ж із зовнішнім механізмом подачі дроту для розширення діапазону робіт

концепція управління», – зазначає Міхаель Айстерхубер. «Зручний 7-дюймовий кольоровий дисплей з динамічною візуалізацією, інтуїтивно зрозумілою графікою та багатомовним меню, в якому можна вибирати з понад 30 мов, робить управління особливо простим – навіть для менш досвідчених користувачів». Три міцні поворотно-натискні кнопки дозволяють здійснювати точний вибір навіть у зварювальних рукавичках. Крім того, всі важливі робочі та зварювальні параметри вже відображаються на першому рівні меню. Важливі налаштування можна зберегти, а новий інтегрований майстер зварювальних параметрів допоможе зварнику вибрати оптимальні налаштування лише за кілька



Простота використання є головним пріоритетом. Доступний у 30 мовах, чіткий 7-дюймовий кольоровий дисплей з динамічною візуалізацією значно спрощує експлуатацію. Новий інтегрований майстер параметрів зварювання допомагає досягти оптимальних налаштувань лише за кілька кроків

кроків. Це зменшує кількість помилок, економить час і підвищує ефективність та якість виробництва.

Максимальна сумісність – готовність до цифрового виробництва. Завдяки стандартним функціям WiFi та Bluetooth Fortis можна повністю інтегрувати у програмне забезпечення Fronius. Пристрої сумісні з WeldCube Air, WeldCube Premium, WeldCube Navigator та Central User Management для адміністрування користувачів, безперебійного документування даних зварювання, управління обладнанням та надійності процесів. Інноваційну зварювальну маску Vizor Connect також можна під'єднати бездротовим способом, що забезпечує максимальний комфорт і захист. NFC-зчитувачі, бездротові пульти дистанційного керування та розширені функції документування доступні як додаткові опції.

У фокусі – екологічність і довговічність. Нова концепція корпусу для серії Fortis базується на високій частці переробного алюмінію (53 %) та зменшує використання пластику. Пристрої особливо прості в обслуговуванні, довговічні, призначені для інтенсивного використання в суворих умовах і ретельно протестовані, внутрішні компоненти надійно захищені ідеальним корпусом всередині. Fortis XT також вражає економією енергії до 16 %, що робить його не тільки надзвичайно потужним, але й екологічним.

Презентація на виставках «FABTECH» та «SCHWEISSEN & SCHNEIDEN». У вересні 2025 р. компанія Fronius вперше представила всі моделі Fortis на виставці «FABTECH» у Чикаго (США) та на виставці «SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» в Ессені (Німеччина). Відвідувачі змогли побачити обладнання наживо, самостійно протестувати його та перекоонатися в зручності використання та продуктивності.

Додаткова інформація на сайті: www.fronius.com/fortis