

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ 2025 ²

«Автоматичне зварювання»

«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)

Видається з 1948 р.

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as

Published since 1948

ЗМІСТ

До 155 річчя від дня народження Є.О. Патона..... 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Лобанов Л.М., Пащин М.О., Міходуй О.Л., Тимошенко О.М., Шиян К.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Кришчук Р.С., Чопик В.В. Магнітоімпульсна обробка зварних з'єднань у процесі зварювання плавленням ... 7

Хаскін В.Ю., Сухий К.М., Овчинников О.В., Зайчук О.В. Застосування мікроплазмового наплавлення для 3D друку деталей двигунів аерокосмічної техніки..... 12

Гайворонський О.А., Позняков В.Д., Сафінський А.В., Завдовєєв А.В., Алексєєнко Т.О., Ящук В.А. Шляхи підвищення опору втомному руйнуванню зварних з'єднань броньових сталей високої твердості.....23

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Царюк А.К., Скульський В.Ю., Єлагин В.П., Осипенко І.Г. Технологічна міцність з'єднань сталі 25ХН3МФА при зварюванні під флюсом..... 29

Бабінець А.А., Рябцев І.О., Лентюгов І.П. Методика оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для дугового наплавлення..... 38

Шаповалов Є.В., Новодранов А.С., Ващенко В.М., Савицький О.М., Топчев Д.Д. Специфіка використання імпульсної дуги та дуги постійної потужності в 3D технологіях наплавлення 45

Кулешов В.А., Покляцький А.Г. Санітарно-гігієнічна оцінка рівня шуму при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів..... 51

ІНФОРМАЦІЯ

Порошкові дроти і стрічки для зварювання, наплавлення та різання..... 56

Розробки Асоціації «ОКО» для неруйнівного контролю рейок..... 64

Навчання зварюванню без зайвих зусиль 65

CONTENTS

On the 155th anniversary of E.O. Paton's birth..... 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L., Timoshenko A.N., Shyian K.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P., Kryshchuk R.S., Chopyk V.V. Magnetic pulse treatment of welded joints in the process of fusion welding 7

Khaskin V.Yu., Ovchynnykov O.V., Sukhyi K.M., Zaichuk O.V. Application of microplasma deposition for 3D printing of aerospace engine parts 12

Gaivoronsky O.A., Poznyakov V.D., Safinsky A.V., Zavdoveev A.V., Alekseenko T.O., Yashchuk V.A. Ways to increase the fatigue fracture resistance of welded joints of high-hardness armored steels 23

INDUSTRIAL

Tsaryuk A.K., Skulskyi V.Yu., Yelagin V.P., Osipenko I.G. Technological strength of 25KhN3MFA steel joints in submerged-arc welding 29

Babinets A.A., Ryabtsev I.O., Lentuygov I.P. Methodology for evaluating the welding and technological properties of flux-cored wires for arc surfacing..... 38

Shapovalov E.V., Novodranov A.S., Vashchenko V.M., Savytskyi O.M., Topchev D.D. Specifics of using pulsed arc and constant power arcs in 3D welding technologies 45

Kuleshov V.A., Poklyatskyi A.G. Sanitary and hygienic assessment of noise levels during friction stir welding of aluminium alloys 51

INFORMATION

Flux-cored wires and strips for welding, surfacing and cutting 56

Developments of the «OKO» Association for non-destructive testing of rails..... 64

Learning to weld without any effort..... 65



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. Книш,
В.М. Коржик, В.А. Костін, Ю.М. Ланкін,
Л.М. Лобанов, С.Ю. Максимов,
О.В. Махненко, М.О. Пашин,
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. Райсен, 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 9 травня 2024 року,
ідентифікатор медіа R30-04566.
ISSN 3041-2374 print
ISSN 3041-234X online
DOI: http://dx.doi.org/10.37434/as

Передплата 2025

Передплатний індекс 70031.
6 випусків на рік (видається раз на два місяці).
Друкована версія: 1800 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.
Електронна версія: 1800 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 будь-який рік.
Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевидаються 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. Korzhik, 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. Reisen, 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 09.05.2024,
carrier identifier R30-04566.
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 «Avtomatychnе 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.

Підписано до друку 14.04.2025.
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7.4.
Друк ТОВ «ДІА». 03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

До 155 річчя від дня народження Є.О. Патона

видатного ученого в області зварювання, мостобудування і матеріалознавства, інженера, педагога, організатора науки та громадського діяча

Євген Оскарович Патон народився 4 березня 1870 р. у родині консула російської імперії в м. Ніцці, Франція. Вищу освіту здобув у 1894 р. у Королівській Саксонській технічній вищій школі у м. Дрездені, Німеччина. Йому пропонували викладати на кафедрі статички споруд і мостів, до того ж він вже почав працювати в проектно-му бюро будівництва нового Дрезденського вокзалу, але він не погодився.

Закінчивши у 1896 р. Петербурзький інститут інженерів шляхів сполучення, Є.О. Патон почав викладацьку діяльність в інституті та одночасно працювати в технічному відділі казенних залізниць, де проєктує мости і перекриття. З весни 1889 р. Є.О. Патон працює в Московському інженерному училищі шляхів сполучення, в 1901 р. захищає дисертацію і призначається професором кафедри мостів.

У 1905 р. Є.О. Патон почав працювати у Київському політехнічному інституті, де очолив кафедру мостів, був вибраний деканом інженерно-будівельного факультету. Він удосконалює навчальні програми, створює лабораторії, інженерний музей, продовжує наукову роботу, видає посібники та підручники. У 1914 р. Є.О. Патон організував мостову секцію при військово-промисловому комітеті Південно-Західного фронту, проєктував та організовував виготовлення мостів, поворотно-підйомних естакад, льодорізів та інших конструкцій. Для переправ через р. Дніпро розробив проєкти 7-ми великих стратегічних розбірних мостів. Близько 35 років наукової, інженерної та педагогічної діяльності Є.О. Патон присвятив мостобудуванню, опу-

блікував понад 160 наукових праць, створив проєкти 35 мостів, перекриттів і перехідів. Вже з 1920 р. Є.О. Патон разом зі своїми учнями бере активну участь у відновленні зруйнованих мостів. Одночасно в 1921-1931 рр. він начальник Київської мостовипробувної станції.

У 1929 р. Є.О. Патон вибраний академіком Всеукраїнської академії наук (зараз НАНУ). Він організує в системі академії Електрозварювальну лабораторію та Електрозварювальний комітет – громадські організації із взаємодії учених та інженерно-технічних працівників, зацікавлених у розвитку зварювального виробництва. Є.О. Патона обрано головою комітету.

У 1929-1933 рр. Є.О. Патон з невеликою групою співробітників виконано дослідження експлуатаційних характеристик зварних конструкцій, проведено порівняльні випробування низки натуральних клепананих і зварних виробів. Результати викладено у 1933 р. в першому вітчизняному посібнику з проєктування зварних конструкцій, який передруковували у закордонних виданнях.

У 1932 р. учений уперше у світі розробив і запропонував комплексну програму розвитку зварювання, яка була підтримана урядом.

У 1934 р. уряд УСРР видав постанову про створення Інституту електрозварювання (ІЕЗ). Директором було затверджено Є.О. Патона. Відповідно до основних напрямків та комплексного характеру діяльності, директор організував в інституті відділи: науково-дослідний, конструкторський, зварювального обладнання, зварних конструкцій, дослідно-виробничу базу (майстерні з виготовлення приладів та апаратів). ІЕЗ став зразком наукової установи, спроможної створювати інноваційні технології від ідеї і фундаментальних досліджень до широкого впровадження у промисловість.

З ініціативи вченого, що приділяв величезну увагу підготовці кадрів, в 1935 р. у Київському індустріальному інституті (нині КПІ) було



Розбірний міст системи Є.О. Патона, 1914 р.



організовано відділення з підготовки інженерів-зварників (згодом зварювальні факультет і кафедра), якими він керував до 1939 р.

Результати дослідження процесів у зварювальній ванні та інші роботи стали основою нового наукового напрямку – металургії зварювальних процесів. Видатним досягненням є створення автоматичного зварювання під флюсом. До початку 1939 р. під керівництвом Є.О. Патона було створено устаткування, матеріали та розроблено технологію швидкісного автоматичного зварювання, що забезпечували високу якість шва при зварюванні конструкційних сталей.

20 грудня 1940 р. керівництво СРСР прийняло постанову про впровадження швидкісного автоматичного зварювання під флюсом у промисловість. Є.О. Патона призначили членом Ради з машинобудування при Раднаркомі СРСР і йому доручався контроль виконання цієї постанови. Одночасно на нього поклали обов'язки керівника відділу електрозварювання ЦНДІ технології машинобудування (м. Москва) зі збереженням керівництва ІЕЗ. За півроку співробітники ІЕЗ встигли впровадити інноваційну технологію на 20-ти великих підприємствах, що значно підвищило продуктивність виробництва. У 1940 р. Є.О. Патон написав монографію «Швидкісне автоматичне зварювання під шаром флюсу».

У серпні 1941 р. ІЕЗ було евакуйовано у м. Нижній Тагіл, де у 1942 р. під керівництвом Є.О. Патона вперше у світі було створено автоматичне зварювання комплексно-легованих броньових сталей, що в десять разів пришвидшило виготовлення корпусів танків. У найкоротший термін під керівництвом Є.О. Патона було організовано потокове виробництво танків всіх типів, авіабомб, реактивних снарядів, а також багатьох інших видів озброєння та боєприпасів. У 1943 р. Є.О. Патону, першому з українських учених, присвоєно звання Героя Соціалістичної Праці.

У 1944 р. ІЕЗ повернувся в м. Київ і Є.О. Патон долучився до вирішення проблем відновлення й розвитку народного господарства країни. Конверсія високоефективної «військової» технології – автоматичного зварювання під флюсом – для цивільного застосування стала основним завданням інституту. До кінця 1944 р. автоматичне зварювання під флюсом було впроваджено на 12-ти великих підприємствах України. У 1947 р. Є.О. Патону доруче-

но науковий та організаційний супровід усіх зварювальних робіт у СРСР. У 1947-1948 рр. на 111-ти заводах країни було запроваджено 670 зварювальних автоматів; в ІЕЗ було організовано підготовку робочих, написані інструкції, створено спеціальний вагон з навчальним і демонстраційним обладнанням.

Є.О. Патон розгорнув фундаментальні дослідження, що стали теоретичною основою науки про зварювання, вдосконалив основи проектування нової зварювальної техніки, систем керування зварювальними процесами, устаткування для виробництва металевих конструкцій та вирішення інших конструкторських проблем.

Одна з ідей Є.О. Патона полягала в розділенні конструкцій на вузли та зварювання спеціалізованими автоматами на окремих позиціях конвеєрних ліній, у принципово новому підході до проектування та виготовлення машин, резервуарів, труб, промислових споруд. Шляхом удосконалення в ІЕЗ вирішувалися завдання технологічності зварних виробів, зниження маси, зменшення кількості сполучних деталей.

Під його керівництвом створюються інноваційні індустриальні методи виробництва труб, зварювання магістральних трубопроводів, негабаритних резервуарів, доменних комплексів, вагонів, суден тощо, в першу чергу на заводах Придніпров'я та Донбасу. У 1946-1948 рр. на Маріупольському заводі ім. Ілліча було введено у дію лінію виробництва залізничних цистерн.

Під активній участі Є.О. Патона вперше у світі були створені: спосіб напівавтоматичного зварювання під флюсом з механізованою подачею електродного дроту через гнучкий шланг до тримача з соплом і бункером, що переміщується вручну; зварювальний пістолет для стельових конструкцій; спеціалізовані установки для зварювання котельного обладнання, будівельних промислових металоконструкцій та ін. Вперше у світі було доведено можливість зміни форми зварних конструкцій і розроблено принципово новий спосіб спорудження великогабаритних листових конструкцій шляхом згортання цільнозварних полотнищ. З 1948 р. цим методом почали будувати резервуари.

Вперше у світі в ІЕЗ були розроблені технології поєданого складання та зварювання, відповідні верстати-автомати та потокові лінії, раціональні зварні конструкції гірничо-шахтного та енергетичного обладнання, металургійних печей, мостів.



Ряд зварювальних апаратів, механізмів і пристроїв, таких як, наприклад: вальцезварювальний верстат для шахтних вагонеток, апарати для електрошлакового зварювання, прохідний стан для автоматичного зварювання труб великого діаметра не мали аналогів за кордоном. Для зварювання під флюсом при виконанні монтажних-будівельних робіт вперше в світі було створено технології і відповідне устаткування для автоматичного зварювання вертикальних і стельових швів. Перша в Європі суцільнозварна доменна піч об'ємом 1033 м³ була зведена в 1948 р. у м. Запоріжжі із застосуванням цієї технології.

З метою підвищення швидкості зварювання були розроблені технології автоматичного зварювання під флюсом електродом, нахиленим вздовж осі шва «кутом уперед», розщепленими електродами та ін. У 1946-1947 рр. в ІЕЗ було створено технологію зварювання зі швидкістю 160...200 м/год двома дугами, що окремо горять, і зварювальна апаратура для здійснення цього процесу. У 1949 р. перший вітчизняний безперервний трубоелектрозварювальний стан, зварювальна апаратура та джерела живлення введені в дію на Харцизькому трубному заводі. Вперше складання і зварювання виконували в одному агрегаті при стаціонарно встановленій зварювальній головці та рухомій заготовці. У 1949-1953 рр. були досліджені процеси та встановлено характер протікання струму через шлакову ванну, плавлення електродного металу та теплообміну між шлаком і виробом, що зварюється. Вперше у світі створено спосіб електрошлакового зварювання, що дозволяє з'єднувати за один прохід товстостінні металокопії.

У 1949-1950 рр. були досліджені закономірності протікання електричних і металургійних процесів при дуговому зварюванні сталей в активних газах. Встановлено можливість підвищення якості металу шляхом додаткового введення розкислювачів, уперше в світі створено технологію зварювання у вуглекислому газі. У 1952 р. були досліджені процеси та встановлені закономірності взаємодії хлору та фтору з компонентами дугової плазми та металу ванни при зварюванні алюмінію та його сплавів. Уперше в світі розроблено хімічні складки галоїдних флюсів та технологія дугового зварювання.

До середини 1950-х років в Україні було відновлено гірничо-металургійну та паливно-

енергетичну промисловість. Розроблено механізований спосіб зварювання кільцевих швів магістральних трубопроводів, які почали застосовувати на будівництві трубопроводу Дашава – Київ – Брянськ – Москва.

У 1952 р. уперше в світі проведено дослідження та встановлено принципову можливість використання зварювальних джерел нагріву для отримання металу особливої чистоти в електрошлаковому процесі, уперше в світі отримано зливков електрошлакового переплаву та створено спеціальну установку для переплаву.

За участі Є.О. Патона та під його керівництвом видаються капітальні праці з різних аспектів зварювальної науки й техніки. Він у 1948 р. організував і був головним редактором журналу «Автоматичне зварювання».

Фундаментальні дослідження стали основою розвитку нових наукових напрямків, провідних інноваційних технологій у багатьох галузях виробництва. Уперше в світі було винайдено електрошлакове зварювання та закладені основи спеціальної електрометалургії високоякісних металів.

У 1947-1952 рр. встановлено закономірності легування металу шва через порошковий дріт. Розроблено склади дротів і техніка дугового наплавлення зносостійких поверхонь виробів, що працюють при високих температурах та ударних навантаженнях.

У 1946-1951 рр. під керівництвом Є.О. Патона створено спеціальну марку низьковуглецевої сталі МСтЗ для зварних мостів, що була малочутливою до термомодеформаційного циклу зварювання; нову конструктивну форму мосту; вдосконалено апаратуру для автоматичного і механізованого зварювання конструкцій; розроблено технологію заводського і монтажного зварювання. Зразком універсального застосування автоматичного зварювання під флюсом є спорудження цільнозварного



Зварювання балки мостового перекриття, м. Дніпропетровськ, 1952 р.



Арочний міст над алеєю Магдебурзького права у м. Києві, 1910 р.

автодорожного мосту через р. Дніпро у м. Києві протяжністю понад півтора кілометри, що завершилось 1953 р. та визнаного Американським зварювальним товариством видатною зварною конструкцією. Найбільший в Європі суцільнозварний автодорожний міст через р. Дніпро у м. Києві було відкрито у листопаді 1953 р., Євген Оскарович не дожив до його відкриття менше трьох місяців, він помер 12 серпня 1953 р.

Є.О. Патон був організатором багатьох наукових і науково-технічних конференцій, брав активну участь у громадському житті країни. У 1935 р. він був обраний депутатом Київської міської ради депутатів трудящих, а в 1946 р. і 1950 р. – депутатом Верховної Ради СРСР. За видатну наукову, педагогічну та громадську діяльність Є.О. Патон був удостоєний звання Заслуженого діяча науки і техніки, нагороджений орденами і медалями. У 1935 р. він був обраний членом Президії ВУАН, а пізніше – головою Бюро Відділення технічних наук. Його двічі обирали віце-президентом АН УРСР. На цих посадах він зробив великий особистий внесок у зміцнення зв'язків інститутів АН УРСР з виробництвом, у розширення не тільки фундаментальних, а також і прикладних досліджень, що мали важливе значення для вирішення актуальних проблем науково-технічного прогресу.

Є.О. Патон створив відому в усьому світі патонівську науково-інженерну школу, яка стала символом ефективної реалізації фундаментальних наукових розробок і ще зробить багато корисного для розвитку науки і техніки в Україні.

Д.і.н. Олександр Корнієнко



Міст ім. Є.О. Патона сьогодні

МАГНІТОІМПУЛЬСНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ У ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Міходуй¹, О.М. Тимошенко¹, К.В. Шиян¹, О.М. Карлов²,
І.П. Кондратенко², Р.С. Кришук², В.В. Чопик²

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

²ІЕД НАН України. 03057, м. Київ, просп. Берестейський, 56. E-mail: ied1@ied.org.ua

Обробка імпульсним електромагнітним полем (ОІЕМП) зварних з'єднань призводить до зниження рівня залишкових зварювальних напружень. ОІЕМП у процесі зварювання сприяє підвищенню ефективності зварювального процесу (у порівнянні з ОІЕМП після зварювання) та простоті його технічної реалізації. На базі математичного моделювання та експериментальних досліджень магнітоімпульсних процесів розроблено автоматизований комплекс для зварювання ТІГ, що є сумісним з ОІЕМП металу шва в умовах термодформаційного циклу зварювання. Бібліогр. 20, рис. 6.

Ключові слова: імпульсне електромагнітне поле, зварні з'єднання, залишкові зварювальні напруження, ТІГ зварювання, диспергування структури, математичне моделювання, алюмінієвий сплав

Вступ. Розвиток промисловості ініціює дослідження прогресивних технологій для підвищення експлуатаційних властивостей зварних конструкцій. Перспективною в цьому напрямку є обробка зварних з'єднань імпульсним електромагнітним полем (ОІЕМП) [1–20]. Базуючись на результатах досліджень [1–5, 11], слід зазначити, що дія імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП) є дієвим інструментом впливу на напружений стан зварних з'єднань. При цьому ефективність впливу підвищується при його застосуванні в умовах зварювання [5]. На базі ОІЕМП можуть бути розроблені ефективні технології керування напружено-деформованим станом зварних з'єднань із неферомагнітних металевих матеріалів, до яких належать алюмінієві сплави, які застосовуються в авіаракетній та суднобудівній промисловості.

Метою даної роботи є розробка наукових засад застосування ОІЕМП у процесі зварювання неферомагнітних матеріалів на прикладі алюмінієвого сплаву АМг6.

Методика досліджень. Підвищення ефективності ОІЕМП у процесі зварювання в порівнянні з обробкою при кімнатній температурі базується на наступних засадах: підвищення продуктивності зварювального процесу внаслідок переходу від послідовного до одночасного проведення основних технологічних операцій; можливість автоматизації; підвищення ефективності обробки для зниження залишкових зварювальних напружень згідно з механізмом, наведеним у [11]; диспергування структури металу зварного шва під час магнітодинамічних дій в умовах підвищених температур;

використання елементів збирального оснащення в якості екранів для підвищення величини електромагнітного тиску на метал, що обробляється.

Як відомо, при протіканні по провідникам індуктора імпульсу електричного струму (ІЕС) у наближеному електропровідному середовищі збуджуються вихрові струми. Як доведено в [12, 13], внаслідок взаємодії індуктованих струмів з ІЕМП, яке збудило ці струми, виникає електродинамічна сила P , нормальна складова якої здійснює активне навантаження на ділянку металевих матеріалу, що обробляється і, як наслідок, змінює його напружений стан. За умови, що щільність j індукваного електричного струму досягає у металі, що обробляється, значення $j \geq 1$ кА/мм², створюються умови для реалізації ефекту електропластичності (ЕПЕ) [11–13]. Це сприяє інтенсифікації пластичного деформування матеріалу і, як наслідок, релаксації його залишкового напруженого стану. Для реалізації ОІЕМП використовували плоский індуктор із зовнішнім діаметром 95 мм та індуктивністю $L = 120$ мкГн [12]. Для генерації ІЕМП застосовували джерело живлення на базі конденсаторної системи загальною ємністю $C = 5140$ мкФ, зарядною напругою U до 800 В і запасеною енергією $E_z \sim 1,6$ кДж. Для оцінки ефективності ОІЕМП використовували зразки у формі диску завтовшки $\delta = 1$ мм і діаметром $D_{зр} = 90$ мм із алюмінієвого сплаву АМг6 зі швом, виконаним зварюванням ТІГ. Зварні з'єднання на поверхні диску були зроблені у формі кільця діаметром $D_{зв} = 45$ мм. Таким чином, між зварним швом і вільним краєм диску була відстань у 45 мм.

Лобанов Л.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О. – <http://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,
Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Шиян К.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9198-6554>,
Карлов О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>, Кондратенко І.П. – <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>,
Кришук Р.С. – <https://orcid.org/0000-0002-1933-0144>, Чопик В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, О.М. Тимошенко, К.В. Шиян, О.М. Карлов, І.П. Кондратенко, Р.С. Кришук, В.В. Чопик, 2025

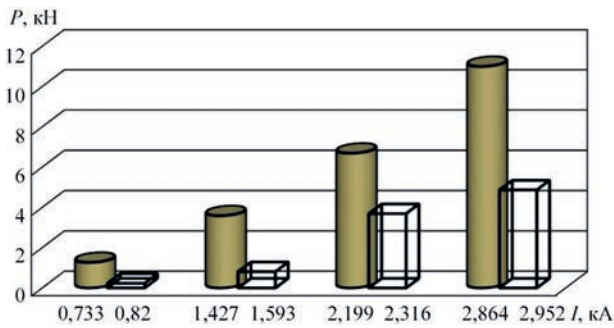


Рис. 1. Вплив амплітудних значень ІЕС – I на силу тиску P при ОІЕМП зразків кільцевих зварних з'єднань $\delta = 1,0$ мм зі сплаву АМг6: □ – ОІЕМП без екрана; ■ – ОІЕМП з екраном

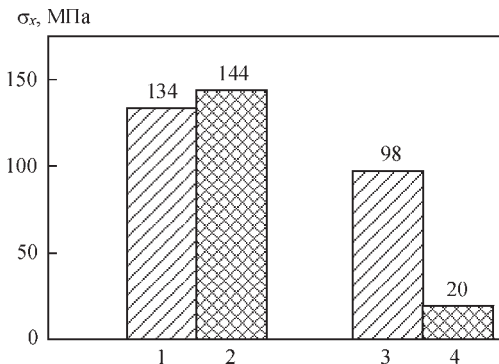


Рис. 2. Вплив ОІЕМП зварного шва без застосування (1, 3) та із застосуванням (2, 4) екрана на залишкові напруження σ_x у металі шва зварного з'єднання сплаву АМг6: 1, 2 – до ОІЕМП; 3, 4 – після ОІЕМП

Методом електронної спекл-інтерферометрії [12, 14] проводили оцінювання σ_x тангенціальної компоненти напруженого стану зварних з'єднань у точках на лінії кільцевого зварного шва.

Результати досліджень. Виконували ОІЕМП зразків завтовшки $\delta = 1,0$ мм та збірки зразка $\delta = 1,0$ мм зі струмопровідним екраном зі сплаву АМг6 також у формі диску $\delta = 5,0$ мм ($\Sigma\delta = 6$ мм) і діаметром 90 мм. ОІЕМП проводили серією із восьми ІЕС на режимі при зростанні значень U у наступній послідовності: $U_1 = 200$ В, $U_2 = 400$ В, $U_3 = 600$ В, $U_4 - U_8 = 800$ В. ІЕС при $U_1 - U_3$ сприяли поступовому виходу на номінальний режим,

а ІЕС при $U_4 - U_8$ – генерації ІЕМП для обробки зразків. Вибір кількості ІЕС при номінальному режимі обробки (при напрузі 800 В) був оснований на результатах [15].

У [16] із застосуванням методики на базі датчика Холла було проведено оцінювання напруженості H магнітного поля індуктора, задіяного в даній роботі. Встановлено, що значення H індуктора при розряді ємності при напрузі $U = 200$ і 500 В досягали відповідно 10 і 30 кА/м.

Електромагнітна сила P зі збільшенням товщини буде зростати, оскільки визначається як інтегральна величина в певному об'ємі, що підтверджують дані рис. 1 та результати [12]. При зростанні δ до 6,0 мм (внаслідок застосування екрана) значення P підвищуються більш ніж удвічі у порівнянні з ОІЕМП без екрана зразків $\delta = 1,0$ мм. Для ефективної обробки тонких зразків необхідно зменшувати тривалість струмового імпульсу. Такий шлях, очевидно, вимагає зміни параметрів розрядних контурів, що не є доцільним. У роботі запропоновано найпростіший і ефективний шлях у вигляді встановлення додаткових шарів спорідненого матеріалу, за якого еквівалентна товщина буде оптимальною з точки зору досягнення найбільшого значення сили P електромагнітного тиску. Запропонований шлях є аналогічним застосуванню металевих «супутників» при технології електромагнітного формоутворення, наприклад роздавання або обтиснення [10, 11, 17]. На рис. 2 наведено розподіли залишкових напружень σ_x до ОІЕМП, а також σ_x після ОІЕМП зразка без та із застосуванням екрана, які підтверджують ефективність екранування при ОІЕМП. Враховуючи наведене, слід зазначити, що ОІЕМП може бути ефективним засобом керування залишковим напруженим станом зварних конструкцій із алюмінієвих сплавів. Результати металографічних досліджень зразків до та після ОІЕМП підтвердили позитивний вплив обробки на еволюцію структури металу зварного шва (рис. 3). У загальному вигляді

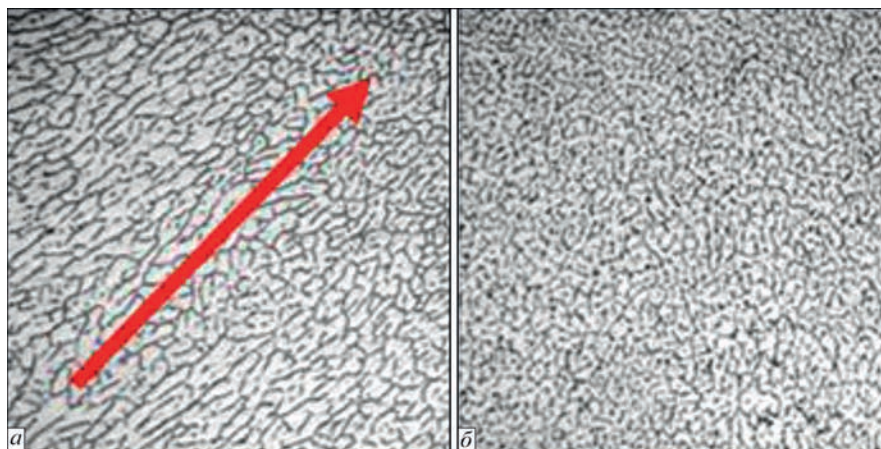


Рис. 3. Мікроструктура ($\times 200$) металу зварного шва сплаву АМг6: у вихідному стані (до ОІЕМП) (а), де стрілка вказує напрям зростання кристалів; після ОІЕМП (б)

ді мікроструктура являє собою світлу матрицю – α -твердий розчин із виділенням надлишкової фази у вигляді сітки по границях кристалів. Але якщо без ОІЕМП кристали мають переважно витягнуту форму, орієнтовану вздовж напрямку їх зростання (стрілка на рис. 3, *a*), то після ОІЕМП з екрануванням має місце рівновісна орієнтація зерен (рис. 3, *b*), що супроводжується їх диспергуванням. Отримані результати можна пояснити динамічним впливом сили P та вихрових струмів на міжзеренні границі в процесі ОІЕМП, який супроводжується локальним джоулевым розігрівом зерен [18–20].

На базі результатів [20] проведено математичне моделювання електрофізичних параметрів ОІЕМП зварного шва в процесі зварювання. Результати моделювання (рис. 4) мають сприяти оптимізації параметрів ОІЕМП для релаксації залишкових напружень тонколистових зварних з'єднань. На рис. 4, *a* представлено схему позиціонування П-подібного ін-

дуктора для ОІЕМП вздовж напрямку зварювання V_w (стрілка), де лінія 1 – поверхня зварного шва перед індуктором, лінія 2 – відповідно в зоні безпосередньої дії ІЕМП на метал зварного шва. На рис. 4, *b* наведено розподіл напруженості H ІЕМП, що дозволяє визначити оптимальне положення індуктора відносно зварювального пальника, яке визначається максимальним значенням H вздовж лінії 1 (початок лінії на бічній поверхні П-подібного індуктора). Із результатів на рис. 4, *b* можна зробити висновок, що на відстані 40 мм від краю магнітопроводу ($x = 0$) значення H є близьким до нуля. Діаграма на рис. 4, *b* дозволяє визначити відстань між індуктором і пальником для зварювання, на якій вплив ІЕМП на зварювальний процес є мінімальним. На рис. 4, *в* представлено розподіл H ОІЕМП вздовж лінії 2 (рис. 4, *a*).

На рис. 5 наведено результати моделювання часових розподілів електрофізичних параметрів ОІЕМП зварного шва. На рис. 5, *a* виділено ділян-

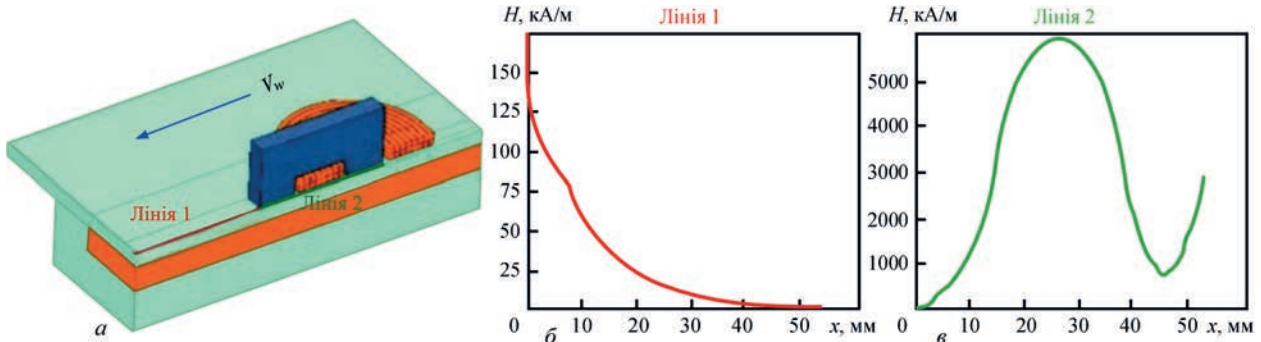


Рис. 4. Математичне моделювання електрофізичних параметрів ОІЕМП (зварного шва) в процесі зварювання: *a* – схема позиціонування П-подібного індуктора ОІЕМП вздовж напрямку зварювання V_w ; *b* – розподіл напруженості H ІЕМП вздовж лінії 1; *в* – розподіл напруженості H ІЕМП вздовж лінії 2

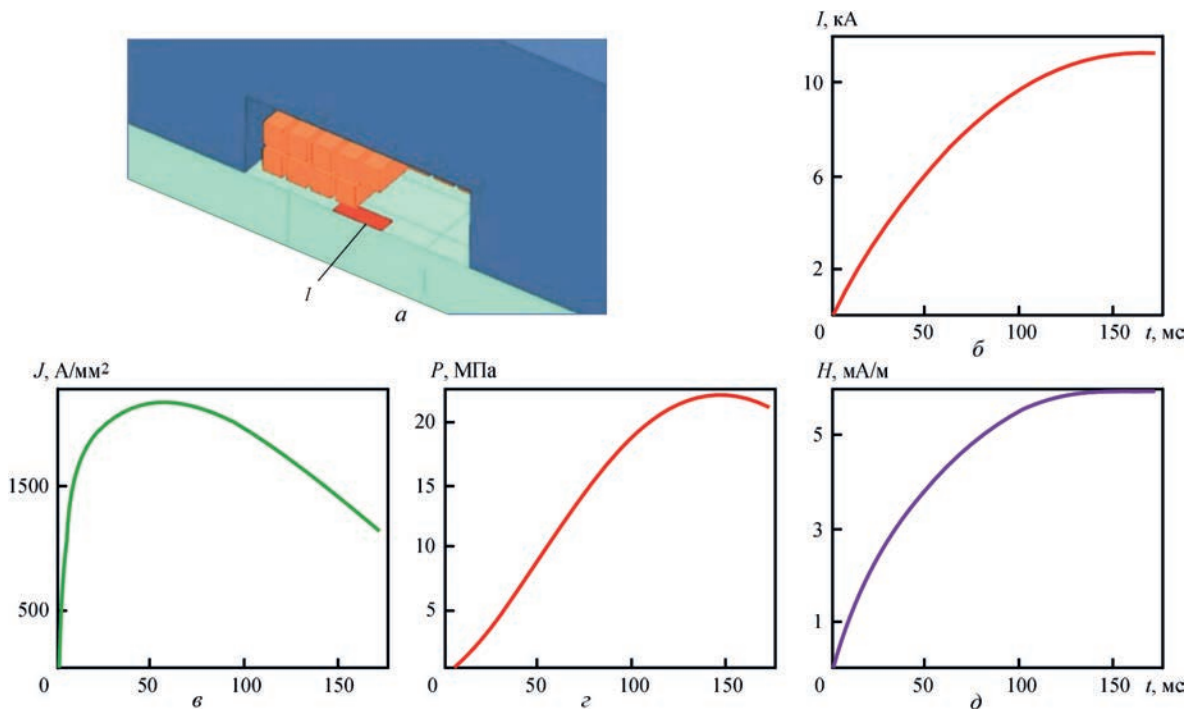


Рис. 5. Результати моделювання часових розподілів електрофізичних параметрів ОІЕМП зварного шва (пояснення рис.5, *a*–5, *e* надані в тексті)

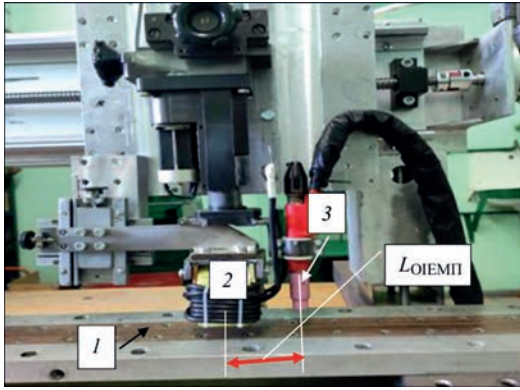


Рис. 6. Автоматизований комплекс для зварювання ТІГ в умовах супутньої ОІЕМП зварного шва: 1 – формуюча підкладка, що виконує роль екрана; 2 – індуктор; 3 – пальник; $L_{\text{ОІЕМП}}$ – відстань між пальником і лінією 1 індуктора (рис. 4)

ку 1 із розмірами 3,5×5 мм (що відповідає задньому фронту зварювальної ванни), для якої визначено середню густину струму J (рис. 5, в) і середнє значення тиску P (рис. 5, з) за час дії ІЕС – I (рис. 5, б) на застигаючий зварний шов, що сприяє релаксації зварювальних напружень. У момент часу біля 50 мкс середня густина струму J на поверхні металу становить близько 2200 А/мм² (рис. 5, в), а тиск P досягає максимального значення при 150 мкс – 23 МПа (рис. 5, з). Це має забезпечити релаксацію зварювальних напружень на стадії їх формування при застиганні зварного шва на базі реалізації ефекту електропластичності [7]. На рис. 5, д наведено розподіл напруженості H ІЕМП в поперечному перерізі індуктора для моменту найбільших значень I та H ІЕМП, що забезпечують релаксацію напружень.

На базі результатів досліджень [1–8, 11–12, 20] розроблено автоматизований комплекс для ТІГ зварювання в умовах ОІЕМП застигаючого металу зварного шва (рис. 6), де в якості екрана (що підсилює дію сили P) виступає формуюча підкладка 1 із неферомагнітного матеріалу, а відстань $L_{\text{ОІЕМП}}$ між лінією 1 індуктора 2 і пальником ТІГ 3 забезпечує максимальну ефективність ОІЕМП у процесі зварювання.

Висновки

1. Показано, що ОІЕМП позитивно впливає на залишковий напружений стан і структуру зварних з'єднань, а ефективність впливу підвищується в умовах зварювання ТІГ.

2. Встановлено, що підвищення ефективності ОІЕМП у процесі зварювання в порівнянні з обробкою при кімнатній температурі базується на зростанні продуктивності зварювального процесу внаслідок переходу від послідовного до одночасного проведення основних технологічних операцій, можливості автоматизації обробки, позитивному впливі термічного циклу зварювання.

3. Показано, що застосування ОІЕМП сприяє зниженню залишкових напружень і диспергуванню структури металу шва у зварних з'єднаннях зі сплаву АМг6.

4. Розроблено математичну модель процесу ОІЕМП, на базі якої доведено, що значення електрофізичних параметрів обробки забезпечують релаксацію залишкових напружень на базі реалізації ефекту електропластичності.

5. За результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень магнітоімпульсних процесів розроблено та виготовлено автоматизований комплекс для зварювання ТІГ в умовах супутньої ОІЕМП.

Список літератури

- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of aluminium alloy AMg6 and its welded joints. *The Paton Welding J.*, 1, 2–6.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mihodui, O.L. (2014) Repair of the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld. Res. Appl.*, 1, 55–62.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the AMg6 aluminum alloy under cyclic loading. *Strength of Materials*, 47, 447–453. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9676-5>
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Timoshenko, A.N. et al. (2017) Effect of the electrodynamic treatment on the life of AMg6 aluminum alloy weld joints. *Strength of Materials*, 49, 234–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>
- Korzhih, V.N., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. et al. (2017) Comparative evaluation of methods of arc and hybrid plasma arc welding of aluminum alloy 1561 using consumable electrode. *The Paton Welding J.*, 4, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.06>
- Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. (2003) *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий*. Под ред. проф. Ю.В. Батыгина. Харьков, МОСТ–Торнадо.
- Andrea, D., Burleta, T., Körkemeyerb, F. et al. (2019) Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Materials & Design*, 183, 108153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>
- Nayanathara Hendeniya, Gayan Aravinda Abeygunawardena, Indika De. Silva, Shiranga Wickramasinghe (2020) The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. In: *2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*, 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCOn50084.2020.9185238>
- Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнятов А.В. (2009) *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями*. Монография. Харьков, ХНАДУ.
- Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хавин В.Л. (2009) *Способ магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлических заготовок*. Патент України № 74909, 15.02.2006, Бюл. № 2.
- 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>
- 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>
- Васецкий Ю.М., Дзюба К.К. (2017) Аналитический метод расчета квазистационарного трехмерного электромагнитного поля тока, протекающего по контуру произвольной конфигурации вблизи электропроводного тела. *Технічна електродинаміка*, 5, 7–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.007>

14. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **1**, 24–29.
15. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, **44** (5), 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
16. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Repair welding of intermediate cases of aircraft engines from high-temperature magnesium alloy ML10 with application of electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, **11**, 28–33.
17. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. (1977) *Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов*. Харьков, Вища школа.
18. Батигин Ю.В., Чаплыгин Е.А. (2006) Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках. *Электротехника і електромеханіка*, **5**, 54–59.
19. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, ИПП.
20. Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Кришук Р.С. (2019) Электромагнітне поле індуктора з Ш-подібним осердям для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. *Технічна електродинаміка*, **6**, 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>
8. Nayanathara Hendeniya, Gayan Aravinda Abeygunawardena, Indika De. Silva, Shiranga Wickramasinghe (2020) The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. In: *2020 Moratuwa Engineering Research Conf. (MERCCon)*, 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCCon50084.2020.9185238>
9. Turenko, A.N., Batygin, Y.V., Gnatov, A.V. (2009) *Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.3: Theory and experiment of attraction of thin-walled metals by pulsed magnetic fields*. Monography. Kharkiv, KHNADU [in Russian].
10. Batygin, Y.V., Lavinskyi, V.I., Khavin, V.L. (2009) *Method of magnetic pulsed processing of thin-walled metal billets*. Pat. UA 74909, 15.02.2006 [in Ukrainian].
11. 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/s11223-022-00474-y>
12. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. (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/s11223-021-00350-1>
13. Vasetsky Y.M., Dzyuba K.K. (2017) Analytical method of calculation of quasi-stationary three-dimensional electromagnetic current field flowing along a contour of arbitrary configuration near an electrically conductive body. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **5**, 7–17 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.007>

References

1. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V., Mikhoduj, O.L., Kondratenko, I.P. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of aluminum alloy AMg6 and its welded joints. *The Paton Welding J.*, **1**, 2–6.
2. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2014) Repair of the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld. Res. Appl.*, **1**, 55–62.
3. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the AMg6 aluminum alloy under cyclic loading. *Strength of Materials*, **47**, 447–453. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9676-5>
4. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Timoshenko, A.N. et al. (2017) Effect of the electrodynamic treatment on the life of AMg6 aluminum alloy weld joints. *Strength of Materials*, **49**, 234–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>
5. Korzhik, V.N., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2017) Comparative evaluation of methods of arc and hybrid plasma-arc welding of aluminum alloy 1561 using consumable electrode. *The Paton Welding J.*, **4**, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.06>
6. Batygin, Y.V., Lavinsky, V.I., Khimenko, L.T. (2003) Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Ed. by Yu.V. Batygin. Kharkov, MOST-Tornado [in Russian].
7. Andrea, D., Burlata, T., Körkemeyerb, F. et al. (2019) Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Materials & Design*, **183**, 108153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>
14. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **1**, 24–29.
15. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, **44**(5), 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
16. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Repair welding of intermediate cases of aircraft engines from high-temperature magnesium alloy ML10 with application of electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, **11**, 28–33.
17. Belyi, I.V., Fertik, S.M., Khimenko, L.T. (1977) *Handbook on magnetic pulse treatment of metals*. Kharkiv, Vyshcha Shkola [in Russian].
18. Batygin, Yu.V., Chaplygin, E.A. (2006) Eddy currents in flat sheet metal blanks. *Elektrotehnika і Elektromekhanika*, **5**, 54–59 [in Russian].
19. Strizhalo, V.A., Novogrudsky, L.S., Vorobiev, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures with regard to the influence of electromagnetic fields*. Kyiv, IPP [in Russian].
20. Rashchepkin, A.P., Kondratenko, I.P., Karlov, O.M., Kryshchuk, R.S. (2019) Electromagnetic field of an inductor with a W-shaped core for magnetic pulse treatment of materials. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **6**, 5–12 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>

MAGNETIC PULSE TREATMENT OF WELDED JOINTS IN THE PROCESS OF FUSION WELDING

L.M. Lobanov¹, M.O. Pashchyn¹, O.L. Mikhodui¹, A.N. Timoshenko¹, K.V. Shyian¹, O.M. Karlov², I.P. Kondratenko², R.S. Kryshchuk², V.V. Chopyk²

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

E-mail: olha.mikhodui@gmail.com

²Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. 56 Beresteyskiy Ave., 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: ied1@ied.org.ua

Treatment with a pulsed electromagnetic field (TPEMF) of welded joints leads to a decrease of residual welding stress level. TPEMF in the welding process contributes to an increase in the efficiency of the welding process (compared to PEMF after welding) and the simplicity of its technical implementation. On the basis of mathematical modelling and experimental studies of magnetic pulse processes, an automated complex for TIG welding has been developed that is compatible with TPEMF of the weld metal under the conditions of a thermal deformation welding cycle. 37 Ref., 6 Fig.

Keywords: pulsed electromagnetic field, welded joints, residual welding stresses, TIG welding, structure dispersion, mathematical modelling, aluminium alloy

Отримано 08.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 28.02.2025

Прийнято 10.04.2025

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДЛЯ 3D ДРУКУ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

В.Ю. Хаскін¹, К.М. Сухий², О.В. Овчинников², О.В. Зайчук²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: khaskin1969@gmail.com

²Український державний університет науки і технологій. 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2.

Роботу присвячено встановленню базових технологічних закономірностей і особливостей формування характерних структур шарів металу при адитивному мікроплазмовому наплавленні порошками корозійно- та жаростійких сплавів і визначенню перспектив цього процесу для 3D друку деталей авіаційної техніки. У роботі встановлено, що вибір режиму адитивного мікроплазмового наплавлення обраної групи порошків переважно обумовлений розміром фракції присадного порошку. Визначено погонну енергію та теплову потужність стисненої дуги для вирощування металевих виробів з товщиною стінки до 3 мм із застосуванням порошків на основі Fe і Ni фракцією 40...100 мкм. Визначено основні особливості структуроутворення металу зразків, отриманих мікроплазмовим наплавленням, їх механічні характеристики, оцінено схильність до вигорання легуючих елементів наплавленого сплаву. Показано, що, не дивлячись на необхідність фінішної механічної обробки відповідальних функціональних поверхонь, застосування мікроплазмового наплавлення можна вважати достатньо перспективним напрямом 3D друку металевих деталей авіаційної техніки. Бібліогр. 16, табл. 5, рис. 11.

Ключові слова: 3D друк, нікелевий сплав, мікроплазмове наплавлення, металеві порошки, технологічні режими, дендритна структура, тепловідведення, механічні властивості

Вступ. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Застосування 3D друку металевими порошковими матеріалами є перспективним напрямом у сучасній авіакосмічній промисловості. Так, при проектуванні швидко адаптованих технологій виготовлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) виникає необхідність розробки паливно-ефективних і гнучких технологічних рішень. Такі виробы можуть досить просто та швидко виготовлятися з полімерних або металевих матеріалів [1]. Для створення подібних деталей найкраще підходять технології 3D друку [2]. За допомогою даних технологій можуть виготовлятися як корпусні елементи, так і компоненти двигунів [3].

Для скорочення часу простою літака при його ремонті часто необхідним є застосування багаторівневих виробничих систем, які виготовляють складні коштовні компоненти, а також потрібні значні інвестиції у складські комплекси, щоби забезпечити своєчасну поставку виготовлених деталей [4]. Натомість застосування адитивних технологій дозволяє безпосередньо на місці вчасно здійснювати виробництво складних деталей на основі цифрових даних без складних інструментів чи механізмів. Особливо актуальним такий підхід є для адитивного наплавлення (або 3D друку) металевими порошками з отриманням готових металевих виробів [5].

При технічному обслуговуванні та ремонті аерокосмічних апаратів для 3D друку готових металевих деталей у даний час застосовують різні адитивні технології, зокрема, надзвукове осадження частинок (supersonic particle deposition – SPD) і лазерне адитивне осадження (laser additive deposition – LAD) [6]. Такі технології використовуються для зниження вартості ремонту та обслуговування, підвищення експлуатаційної готовності апаратів. Проте дані технології самі по собі є досить витратними у промисловому застосуванні, а також мають порівняно низьку продуктивність [7]. Значимо, що однією з основних переваг таких адитивних технологій є висока точність виготовлення виробів. Але така точність не завжди потрібна й у низці випадків може досягатися спільним застосуванням адитивного наплавлення та механічної обробки [8].

Одним зі шляхів подальшого зниження вартості металевих 3D виробів із одночасним підвищенням продуктивності їх виготовлення є застосування дугових методів адитивного наплавлення металів. У цьому сенсі цікавим і перспективним є мікроплазмове порошкове наплавлення [9]. Адитивний мікроплазмовий 3D друк порошками металів є інноваційною технологією на основі зварювання, яка дозволяє створювати деталі відносно невеликого розміру з низькою вартістю та високою

Хаскін В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Овчинников О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5209-7498>,

Сухий К.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4585-8268>, Зайчук О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5209-7498>

© В.Ю. Хаскін, К.М. Сухий, О.В. Овчинников, О.В. Зайчук, 2025

продуктивністю [10]. За допомогою такої технології можливо, зокрема, створювати деталі з функціонально градуированими компонентами [11] або міцні деталі з низькою питомою вагою [12]. Проте зараз 3D друк адитивним мікроплазмовим порошковим наплавленням не отримав розповсюдження через недостатній обсяг даних щодо раціональних режимів процесу, для чого потрібно проводити технологічні дослідження.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи – встановлення базових технологічних закономірностей і особливостей формування характерних структур шарів металу при адитивному мікроплазмовому наплавленні порошками корозійно- та жаростійких сплавів на основі заліза та нікелю, визначення перспектив цього процесу для 3D друку деталей двигунів аерокосмічної техніки.

Для досягнення цієї мети вирішували наступні задачі:

1. Встановлення базових технологічних закономірностей адитивного мікроплазмового наплавлення порошками корозійно- та жаростійких сплавів при виготовленні 3D виробів.
2. Визначення особливостей формування характерних структур шарів металу при адитивному мікроплазмовому наплавленні порошками обраних сплавів.
3. Визначення базових механічних характеристик наплавленого металу шляхом проведення механічних випробувань отриманих адитивним мікроплазмовим наплавленням зразків.

Матеріали, обладнання та методи дослідження. Для досягнення мети роботи та вирішення поставлених завдань було прийнято наступну методику проведення досліджень:

- вибір і підготовка порошкових присадних матеріалів для адитивного мікроплазмового наплавлення;
- вибір параметрів технологічного режиму мікроплазмового наплавлення;
- моделювання конструкції плазмотрону й швидкостей/витрат потоків плазмоутворюючого та захисного газів з метою досягнення сталого ламінарного режиму генерації стисненої плазми;
- створення лабораторного стенду для проведення технологічних досліджень;
- проведення експериментів з наплавлення просторових геометричних примітивів мікроплазмовим способом із застосуванням обраних порошкових присадних матеріалів;
- проведення металографічних досліджень наплавлених зразків, визначення наявності характерних дефектів і шляхів їх усунення, встановлення закономірностей формування характерних структур наплавлених шарів і перспектив застосування цього процесу для 3D друку деталей авіаційної техніки.

При виготовленні тривимірних металевих об'єктів виконувалось пошарове наплавлення на підкладки зі сталі Q235 розмірами 100×100×10 мм. Склад матеріалів підкладки та наплавочних порошків наведені у табл. 1. Корозійностійкі порошки НУФ 103, 316L і ПГ СР2 використовувалися для проведення попередніх досліджень і відпрацювання режимів наплавлення, що дозволило зменшити обсяг експериментальних робіт із жаростійкими порошками ХН50ВМТЮБ (ЭП648) і ХН60ВТ (ВЖ98). Хімічний склад порошків зі сплаву ХН50ВМТЮБ (ЭП648) відповідав вимогам спеціальних технічних умов і галузевому стандарту

Таблиця 1. Хімічний склад присадних порошків і підкладки для наплавлення

Матеріал	Склад елементів, мас. %										
	Fe	B	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	P	S	Інші
Метал підкладки											
Сталь Q235	Основа	–	0,14...0,22	0,05...0,15	0,4-0,65	<0,3	<0,3	<0,3	<0,04	<0,05	
Присадні (наплавочні) матеріали											
Порошок НУФ-103 (грануляція 40...60 мкм)	Основа	1,15	–	0,75	0,6	7,85	15,55	–	<0,02	<0,01	Mo <3,0
Порошок нержавкої сталі 316L (грануляція 40...60 мкм)	Основа	–	0,03	<0,6	<0,8	14...16	15...17	–	<0,02	<0,015	Mo 2,5...3,0
Порошок системи Ni-Cr-B-Si (грануляція 60...100 мкм)	<5,0	2,0...2,8	0,4...0,7	2,5...3,5	–	основа	13,5...16,5	–	<0,04	<0,04	Al <0,8
ХН50ВМТЮБ (ЭП648) порошок 40...100 мкм	<4,0	0,008	<0,03	<0,04	<0,5	основа	32...35	–	<0,010	<0,015	Nb 0,5...1,1; Ti 0,5...1,1; Al 0,5...1,1; Mo 2,3...3,3; W 4,3...5,3
ХН60ВТ (ВЖ98) порошок 60...100 мкм	<4,0	–	<0,1	<0,8	<0,5	основа	23,5...26,5	–	<0,013	<0,013	Ti 0,3...0,7; W 13...16

(ОСТ1 90126-85 та ТУ14-1-3046-97), порошку зі сплаву ХН60ВТ (ВЖ98) – ТУ 14-1-4296-87.

Для наплавлення розроблено спеціалізований мікроплазмовий пальник, про який буде сказано нижче. Для подачі порошків використовували дозатор-живильник оригінальної розробки з регульованим діапазоном витрат порошку $G = 1,0...4,0$ г/хв.

До порошків, що застосовуються для 3D друку деталей із використанням адитивних технологій, висуваються ряд вимог, серед яких обов'язковим є сферична форма порошку та розмір, який не повинен перевищувати 100 мкм. Саме такі порошки найбільш технологічні, мають високу насипну щільність, яку визначали згідно з ДСТУ 2640. Висока насипна щільність свідчила про компактне розташування часток порошку, що важливо для формування виробів на їх основі. У табл. 2 наведено результати визначення насипної щільності порошків зі сплавів ХН60ВТ (ВЖ98) та ХН50ВМТЮБ (ЭП648). Розмір і фракційний склад досліджуваних порошків визначали ситовим аналізом.

Для мікроплазмового наплавлення застосовували порошки правильної сферичної форми; розмір частинок порошку, визначений на не травленому поперечному шліфі, знаходився в межах 48...101 мкм. Приклад металографічного дослідження порошку із жароміцного нікелевого сплаву наведено на рис. 1.

Для виконання наплавлення здійснювали попередню підготовку присадних матеріалів, яка полягала у відборі порошків певного фракційного

Таблиця 2. Результати визначення насипної щільності порошків із жароміцних сплавів

Дані про порошок	Насипна щільність, г/см ³	
Сплав	ХН60ВТ	ХН50ВМТЮБ
60...100	3,41	3,52
≤63	4,25	4,72

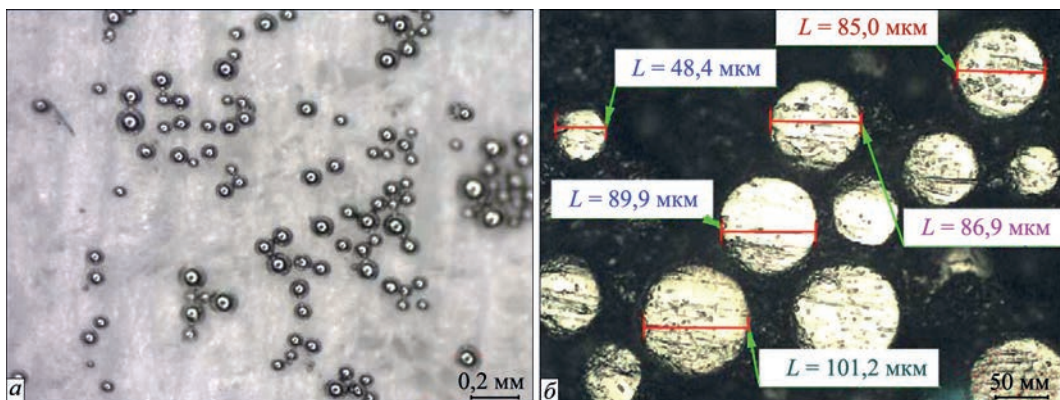


Рис. 1. Порошок із жароміцного нікелевого сплаву ХН50ВМТЮБ: а – зовнішній вигляд (бінокуляр), $\times 40$; б – не травлений поперечний шліф (порошок залитий у бакеліт), $\times 200$

складу шляхом їх просіювання крізь набір відповідних калібрувальних сит. Перед калібруванням за допомогою муфельної печі здійснювали прогрів порошків при температурі 150...200 °С для усунення залишкової вологі, наявність якої пов'язана з їхньою гігроскопічністю.

В якості мікроплазмового джерела живлення використовували Tetrix 421 AC/DC (фірма EWM GmbH, Німеччина), обладнане плазмовим модулем із діапазоном регулювання струму 5...50 А. За базу для створення лабораторного дослідницького пальника адитивного наплавлення було обрано зварювальний плазмотрон установки мікроплазмового зварювання МПУ-4 (Україна), якій піддали необхідній модернізації (рис. 2). Для подачі присадного порошку було спроектовано спеціалізований сопловий вузол із системою сопел, які дозволили, крім захисту зони наплавлення, керувати потоком транспортуючого газу з порошком відповідно до координати стовпа плазми. Також було покращено охолодження вузлів плазмотрона для його надійної роботи в діапазоні струмів 5...100 А. Плазмотрон переміщували відносно зразка, який наплавляли, за допомогою антропоморфного робота-маніпулятора типу ARC Mate 50D (FANUC, Europe).

При проектуванні спеціалізованого соплового вузла модернізованого плазмотрона МПУ-4 застосували розрахунковий пакет SolidWorks Flow Simulation [13]. За допомогою цього пакету було промодельовано та оптимізовано за критерієм ламінаризації течії динаміку газових потоків плазмотрона та конструкцію спеціалізованого соплового вузла подачі порошку для виконання адитивного мікроплазмового наплавлення.

У табл. 3 наведено технологічні параметри процесу мікроплазмового наплавлення, використані при моделюванні роботи плазмотрона МПУ-4 з сопловим вузлом для порошкового наплавлення.

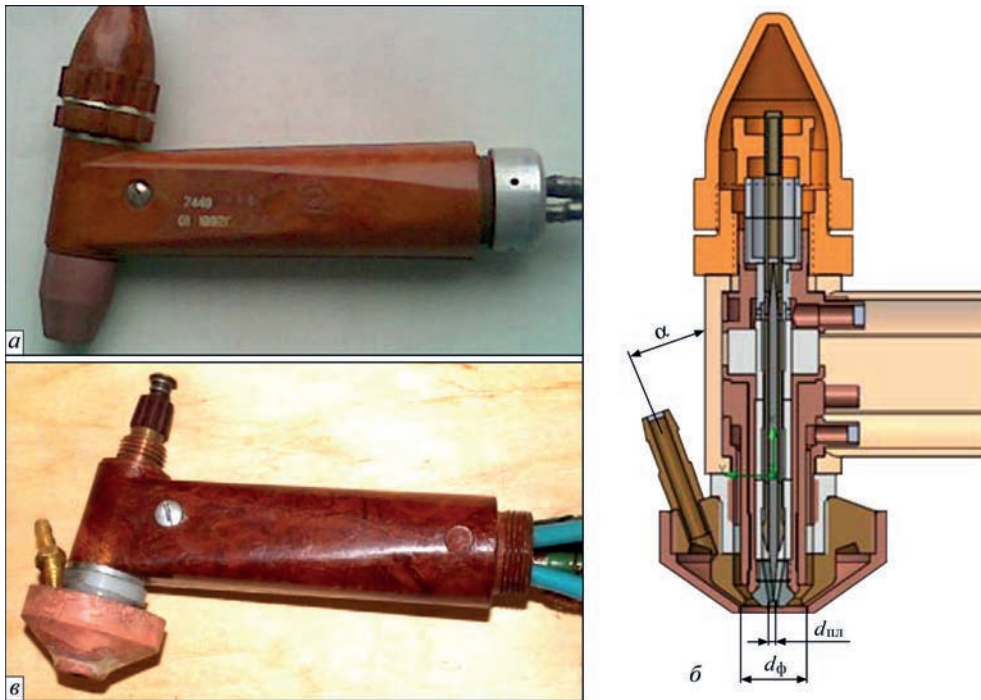


Рис. 2. Загальний вигляд плазмотрона МПУ-4 для мікроплазмового зварювання (а), схема модернізованої конструкції (б) та його вигляд після модернізації (в) із сопловим вузлом для введення порошку в плазмовий струмінь (через штуцер, розташований під кутом $\alpha \leq 45^\circ$ до осі плазмотрона)

Моделювання газодинаміки дало можливість створити модернізовану конструкцію плазмотрона із задовільними результатами для потоків плазмоутворюючого, захисного та транспортуючого порошок газів. На рис. 3 показані лінії потоків плазмоутворюючого, захисного та транспортуючого газів і потоку частинок порошку, що наплавляють. Спроектвана конструкція спеціалізованого соплового вузла дозволила у зонах відповідних каналів і на виході з плазмотрона досягти ламінарної течії потоків.

Для проведення металографічного аналізу із отриманих адитивним наплавленням зразків вирізали поперечні темплети та виготовляли мікрошліфи. Після їх шліфування та полірування для виявлення мікроструктур застосовували електролітичне травлення у хромовій кислоті або сірча-

нокислому амонію [14]. Отримані структури зразків досліджували методами оптичної (мікроскоп Neophot-30 фірми Carl Zeiss, Німеччина) та аналітичної растрової електронної (мікроскоп JSM-840 фірми PHILIPS, Голландія) мікроскопії. За допомогою аналітичної растрової електронної мікроскопії визначали хімічний склад фаз і зерен металу (загальний і локальний точковий аналіз). За допомогою оптичної мікроскопії вивчали структурні зміни. Мікротвердість вимірювали за допомогою мікротвердоміра LM-400 (серії LECO, США) при навантаженні 50 гр. Механічні випробування на статичний розрив проводили за допомогою універсальної розривної сервогідравлічної системи MTS 810 (Material Test System, США) з використанням стандартних зразків (ГОСТ 6996-66), які вирізали із отриманих 3D друком стінок поперек наплавлених валиків.

Результати технологічних досліджень. Проведення технологічних досліджень здійснювалося згідно зі схемою, наведеною на рис. 4 [15]. При цьому мінімальна товщина стінки вирощуваного виробу у проведених дослідженнях з мікроплазмового наплавлення становила до 3 мм. Дослідження показали, що в процесі виготовлення об'ємних виробів адитивним нарощуванням шарів шляхом послідовного наплавлення дуже важливим параметром є розмір нарощуваного шару (наплавленого валика металу), оскільки він визначає характеристики форми та поверхні, а також точність формування виробу. Тому першою задачею, яка

Таблиця 3. Технологічні параметри процесу мікроплазмового наплавлення, використані при моделюванні роботи плазмотрона МПУ-4 з сопловим вузлом порошкового наплавлення

Номер	Назва параметра	Величина
1	Швидкість потоку плазмоутворюючого газу $Ag (Q_{пл})$, л/хв	1,0...1,5
2	Швидкість потоку захисного газу $Ag (Q_2)$, л/хв	10
3	Швидкість потоку транспортуючого газу $Ag (Q_{тр})$, л/хв	12
4	Витрати порошку $Q_{пор}$, г/хв	2,4
5	Швидкість потоку охолоджуючої рідини (на кожний контур) Q_3 , л/хв	1,5
6	Теплова потужність, що виділяється стисненою дугою, Вт	840
7	Розмір частинок порошку, мкм	100

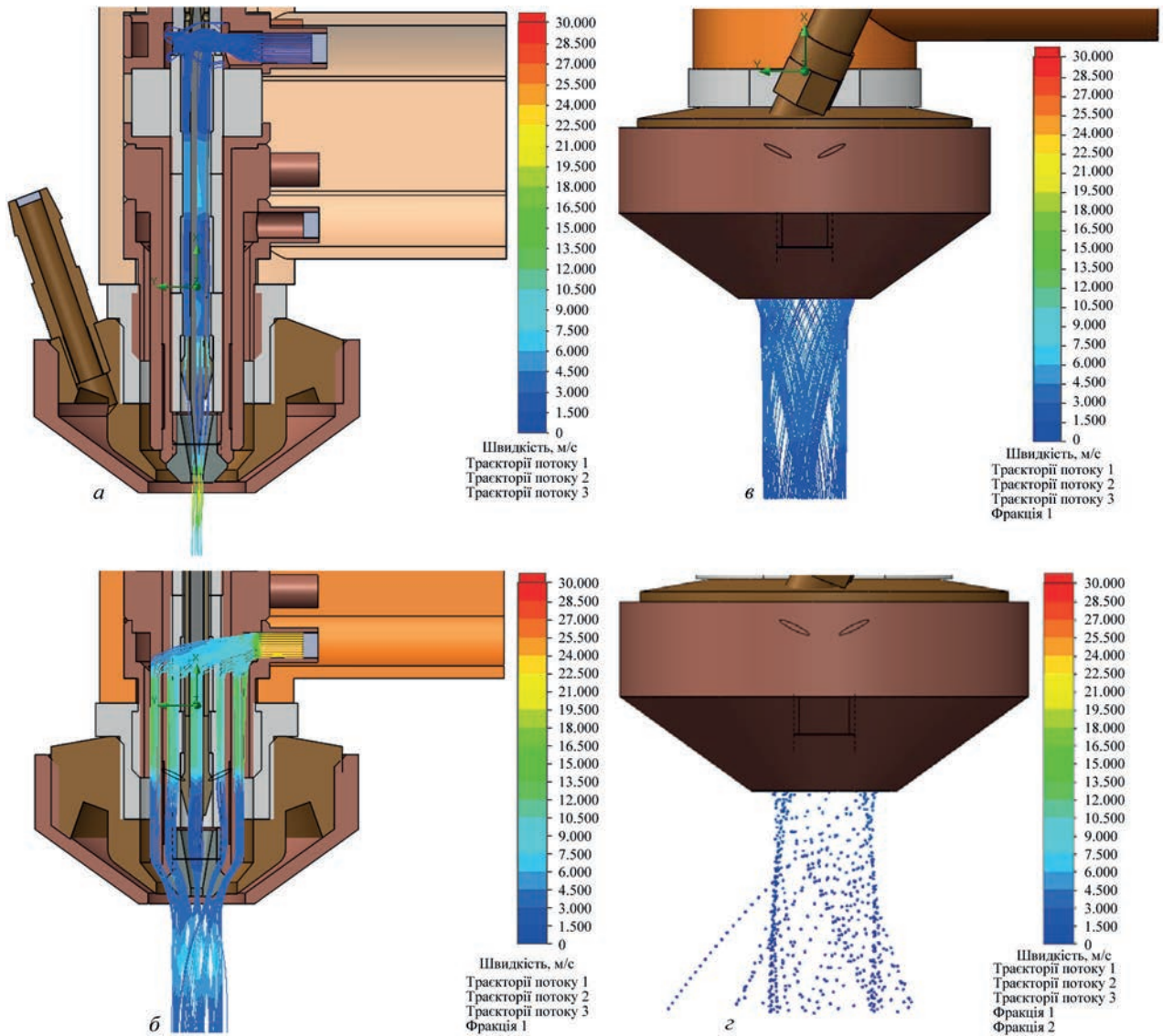


Рис. 3. Швидкість і напрямок газових потоків модернізованого плазмотрона МПУ-4: а – плазмообразуючого; б – захисного; в – транспортуючого; г – потоку частинок порошку

вирішувалася при виборі параметрів режиму наплавлення, було визначення кращого співвідношення між потоком частинок присадного порошку (рис. 3, г) і діаметром мікроплазмової дуги. При цьому враховували різницю умов наплавлення на підкладку та на попередньо наплавлений валик. В останньому випадку при збільшенні струму збільшується об'єм валика за рахунок погіршення тепловідведення, проплавлення попереднього валика та збільшення довжини ванни.

Другою задачею, яка вирішувалася для вибору режиму, було підвищення частки корисних витрат присадного порошку (коефіцієнту КВП) у процесі адитивного виробництва деталі. Досліди показали, що основною причиною втрат порошкової присадки є рух її дисперсних частинок по периферії стовпа плазмової дуги й надалі – пружне відбивання від поверхні виробу, що наплавляється, поза зоною сформованої ванни металу наплавлення.

Отже, у разі реалізації адитивної технології виробництва тонкостінних металевих виробів з товщиною стінки до 3 мм важливо мати можливість керування такими характеристиками процесу, як

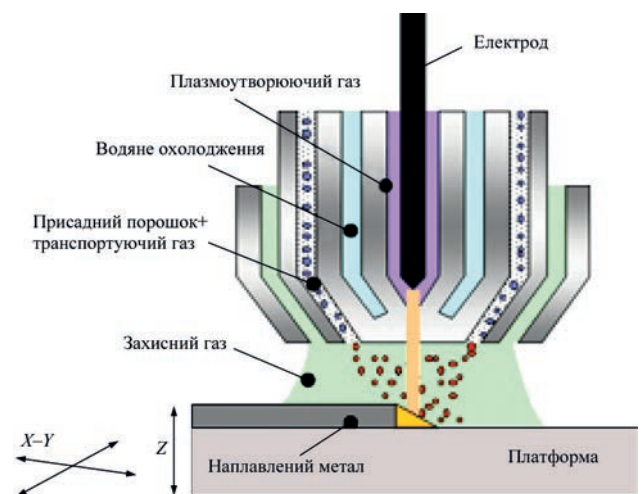


Рис. 4. Схема проведення технологічних досліджень [15]

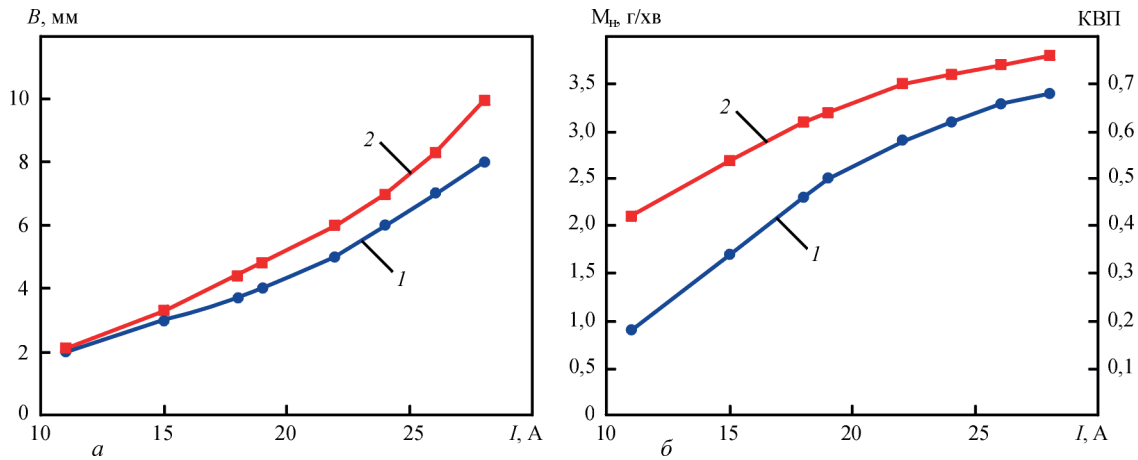


Рис. 5. Залежність ширини валика B (а), питомої маси наплавленого металу (порошок сплаву НУФ 103) M_n та КПВ (б) від сили зварювального струму I при швидкості наплавлення $V = 3,24$ мм/с: 1 – мікроплазматрон з $d_{\text{пл}} = 2,5$ мм, $d_{\text{ф}} = 4,5$ мм, $G = 3,2$ г/хв, $B = 2 \dots 5$ мм; 2 – $d_{\text{пл}} = 1,8$ мм, $d_{\text{ф}} = 2,5$ мм, $B = 4 \dots 10$ мм

зосередженість мікроплазмової дуги та введення порошкової присадки. Зокрема, для оптимізації траєкторій руху присадного матеріалу в плазмовій дузі рекомендується присадні порошки вводити в дугу під кутом α до осі плазматрона до $40 \dots 45^\circ$ (рис. 2, б).

Для досліджень використовували мікроплазматрон з бічним розподілим введенням присадного порошку та діаметрами каналів плазмоутворюючого сопла $d_{\text{пл}} 1,8$ і $2,5$ мм і фокуруючого сопла $d_{\text{ф}} 2,5$ мм і $4,5$ мм (рис. 2, б). При цих розмірах забезпечується його стабільна робота на зварювальному струмі в діапазоні $5 \dots 50$ А. Зосередженість введення присадного порошку із витратами $G = 1,0 \dots 3,5$ г/хв крізь мікроплазмову дугу до площини анода (підкладки, на яку наплавляли перший шар) оцінювали шляхом визначення маси порошку, який потрапив у зварювальну ванну, при послідовному збільшенні її розмірів. Ширина B ванни розплавленого металу (або наплавленого валика) змінювалася зі збільшенням сили зварювального струму при постійній швидкості переміщення мікроплазмової дуги в межах $2 \dots 5$ і $4 \dots 10$ мм (рис. 5, табл. 3). Під час експерименту при послідовному збільшенні ширини зварювальної ванни в 5 разів були отримані залежності зміни питомої маси наплавленого валика M_n і КПВ, що характеризують радіальний розподіл присадного порошку.

Згідно з даними рис. 5 для отримання просторових виробів із товщиною стінки до 3 мм (або ширини наплавленого валика $B \leq 3$ мм) необхідно виконувати мікроплазмове наплавлення при струмі дуги до 15 А. Проте застосування струму до 30 А є небажаним через низьку стабільність процесу. Для підвищення стабільності доцільно підвищити струм дуги плазматрона до $30 \dots 35$ А, що потребує підвищення швидкості наплавлення

з $10 \dots 15$ до 30 м/год для збереження товщини стінки 3 мм.

Подальші технологічні дослідження проводили із витратами присадного порошку $G = 3,0$ г/хв. За критеріями оптимізації форми валика наплавлення та утворення надійного сплавлення із підкладкою та/або попереднім валиком було уточнено режими адитивного мікроплазмового наплавлення застосованих порошків. Було обрано наступні основні параметри режиму наплавлення: струм дуги $I = 35$ А, напруга на дузі $U = 40$ В, швидкість наплавлення $V = 35$ м/год ($9,66$ мм/с), погоня енергія наплавлення $E = 87$ Дж/мм (з урахуванням ККД процесу $0,6$ [16]). Інші параметри режиму наплавлення наведено в табл. 3. Проведені дослідження показали, що при адитивному мікроплазмовому наплавленні обраними порошками (табл. 1) товщина наплавленої стінки із задовільною стабільністю зберігається у межах $3,0 \pm 0,3$ мм (рис. 6). При цьому КПВ знаходиться в діапазоні $0,84 \dots 0,88$ (втрати порошку відповідно становлять $16 \dots 12$ %), що є прийнятними значеннями.

Результати металографічних досліджень.

При адитивному мікроплазмовому наплавленні в усіх випадках застосування присадних матеріалів, перелічених у табл. 1, відбувалося повне

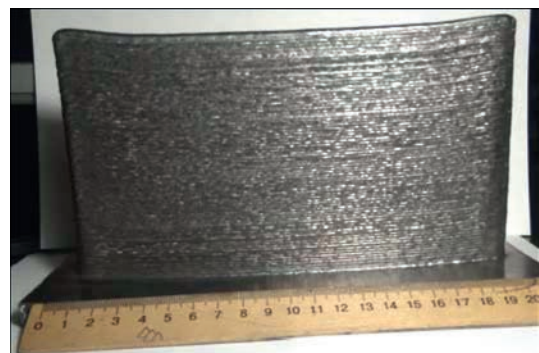


Рис. 6. Зовнішній вигляд пластини металу, отриманого пошаровим мікроплазмовим наплавленням порошку НУФ-103

розплавлення порошку. Структура наплавленого металу характеризувалася явно вираженою шаруватістю, товщина наплавленого шару становила 550...650 мкм. Наплавлення здійснювалося в кілька проходів із послідовним нанесенням шарів металу – по одному за кожний прохід. Зони сплавлення між шарами мали однорідну структуру. Макроструктура кожного наплавленого шару була гомогенною без утворення будь-яких дефектів, розтріскувань, неповного розплавлення.

У разі застосування порошку системи Ni-Cr-B-Si для однопрохідного наплавлення мала місце рівновісна дрібнодисперсна структура металу величів наплавлення. Мікроструктура наплавленого матеріалу складалася із двофазної матриці (рис. 7), в якій переважала складова, що виявлялася світлою при травленні та мала твердість HV 4640...5720 МПа. Поряд із нею присутні світло-сірі виділення з вищою твердістю HV 6030...7010 МПа (рис. 8). Таким чином, у результаті мікроплазмового вирощування виробу мікроструктура нікелевих жароміцних сплавів складалася з матричного g -твердого розчину (світлого кольору), на фоні якого спостерігались інтерметалідні фази типу g' -фази $(Ni, Cr)_3 (Al, Ti, Nb)$ та $Ni(Cr, Mo, W) +$ карбіди. Для підвищення ефекту дисперсійного зміцнення ці сплави, у класичному розумінні, повинні підлягати термічній обробці, проте вибір потрібних температур і тривалості витримки при термообробці інноваційного матеріалу, отриманого 3D пошаровим плазмовим наплавленням, на сьогодні не встановлені. Це може стати предметом подальших досліджень. Ознаки перегрівання або перепалу із стрибкоподібним зростанням розмірів зерен та оплавленням меж зерен у мікроструктурі вирощених зразків не виявлено.

Судячи з наявності піків у результатах замірів мікротвердості та даних мікроструктурного дослідження можна зробити висновок, що в твердий розчин матриці включені більш тверді карбіди різної форми. Зміцнювальні фази мали форму пластини різної товщини, виявляли та-

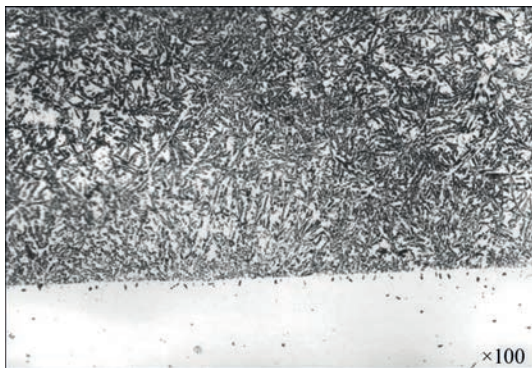


Рис. 7. Структура мікроплазмового наплавлення, $\times 100$

кож їх підковоподібні та ромбоподібні виділення. Карбіди характеризувалися високою твердістю ($HV > 20000$ МПа). Окрім крупних (первинних) карбідів у матриці вирощеного матеріалу спостерігали більш дрібнодисперсні їх виділення, що, вірогідно, сприяло підвищенню міцності та твердості матеріалу. Також по всьому наплавленню спостерігаються евтектичні виділення карбідів із твердістю на рівні HV 2340...3030.

По лінії сплавлення з основним металом спостерігається тонка світла смужка з твердістю HV 2540...2860 МПа. Ця структурна складова є рівномірною по всій довжині наплавлення та її товщина становить 10...12 мкм. Слід зазначити, що структура наплавлення подрібнюється у напрямку від верхнього краю до основного металу підкладки. Мікроаналіз на окремих ділянках структури показав, що наплавлений метал має склад, близький до складу порошку, що наплавлявся (див. табл. 1).

У разі застосування порошку NYF-103 для трипрохідного адитивного наплавлення, згідно з даними електронної мікроскопії, мала місце дрібнодисперсна дендритна структура наплавленого металу, що містить як відносно великі зерна, так і дрібні. Великі та дрібні дендрити утворюють колонії, розорієнтовані одна відносно одної (рис. 9). У верхній та нижній частинах зразка формувались різні за розмірами кристали, що визначалося нерівновісними умовами кристалізації при мікроплазмовому 3D вирощуванні зразка. Так, у нижній частині наплавленого металу тепловідведення здійснювалося через підкладку основи, тоді як у верхній частині зразка – переважно внаслідок теплового випромінювання та тепловідведення – у нижні наплавлені шари. Це зумовило повільніше охолодження металу у верхній частині зразка і, отже, призвело до зростання зерен.

У поздовжньому напрямку дендрити утворювали протяжні гілки кристалітів, орієнтовані пере-

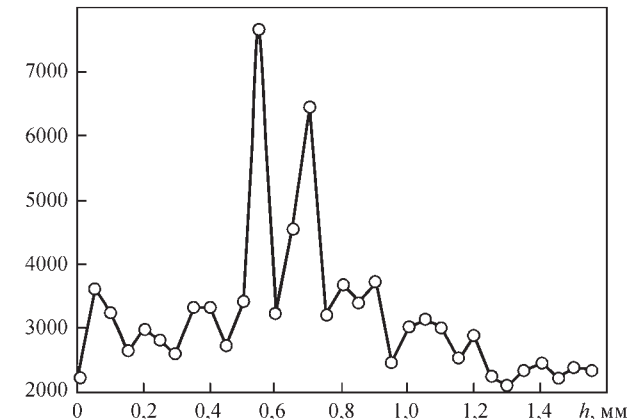


Рис. 8. Розподіл мікротвердості $HV_{0.05}$ МПа за глибиною h , мм

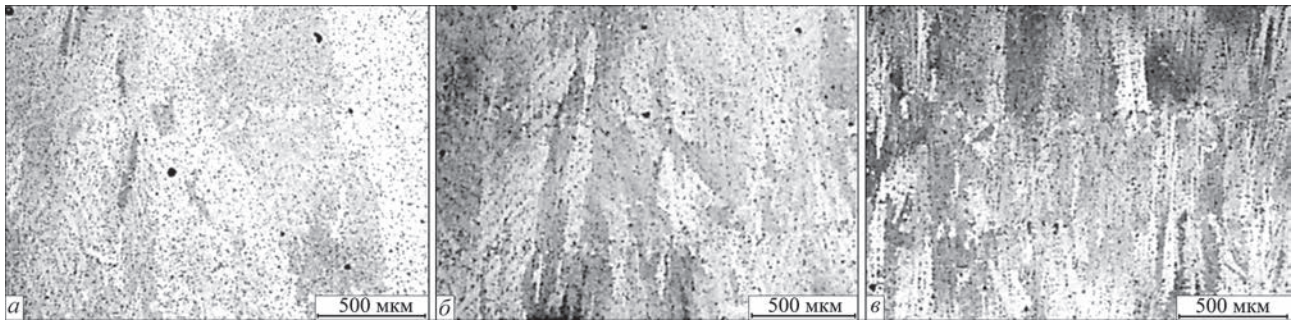


Рис. 9. Мікроструктура металу, отриманого тришаровим адитивним мікроплазмовим наплавленням порошку HYF-103 (100): *a* – верх наплавленого зразка; *б* – середина наплавленого зразка; *в* – низ наплавленого зразка

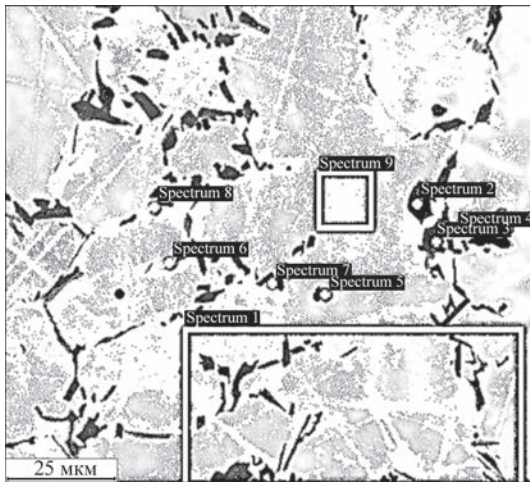


Рис. 10. Мікроструктура металу, отриманого адитивним мікроплазмовим наплавленням порошку HYF-103, із зазначеними ділянками мікроаналізу вмісту елементів

важно у напрямку тепловідведення та об'єднанні в колонії. Аналіз мікроструктури зразка, вирізаного в нижній частині, показав, що зростання кристалітів відбувається в одному напрямку (рис. 9, *в*). Дендрити складаються з блоків зерен з подібною кристалічною орієнтацією, межі яких проявилися в результаті травлення. Порівняння структури металу зразків, вирізаних у поздовжньому напрямку у верхній та нижній частинах зразка, вказує на різний характер кристалізації у міру формування зразку знизу вгору (рис. 9). Мікроаналіз на різних окремих ділянках структури показав, що наплавлений метал має склад, близький до складу порошку, що наплавлявся (рис. 10, табл. 1 і 4).

Мікроструктура зразків зі сплавів ХН50ВМТЮБ та ХН60ВТ при дослідженні за допомогою оптичного мікроскопа відбивного світла в тілі дендри-

Таблиця 4. Вміст на окремих ділянках структури згідно з рис. 10

Спектр	Хімічний склад, мас. %												
	B	N	O	Mg	Si	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	Всього
1	–	–	–	–	0,95	–	16	0,31	72,16	0,32	9,1	1,17	100
2	–	–	–	–	–	–	49,26	–	47,38	–	1,12	2,24	100
3	–	–	–	–	–	0,24	48,64	–	48,09	0,4	0,91	1,72	100
4	–	–	17,41	9,17	8,85	–	9,37	–	48,21	0,41	6,06	0,52	100
5	20,25	19,63	–	–	0,26	–	7,85	0,32	45,51	0,28	5,09	0,81	100
6	–	–	–	–	0,65	0,41	15,52	–	56,74	0,4	6,47	19,8	100
7	–	–	–	–	0,67	0,26	17,15	–	59,99	0,44	6,64	14,85	100
8	–	–	–	–	0,72	0,25	14,86	–	61,16	0,31	7,41	15,28	100
9	–	–	–	–	0,95	–	13,68	–	74,64	0,36	9,79	0,58	100

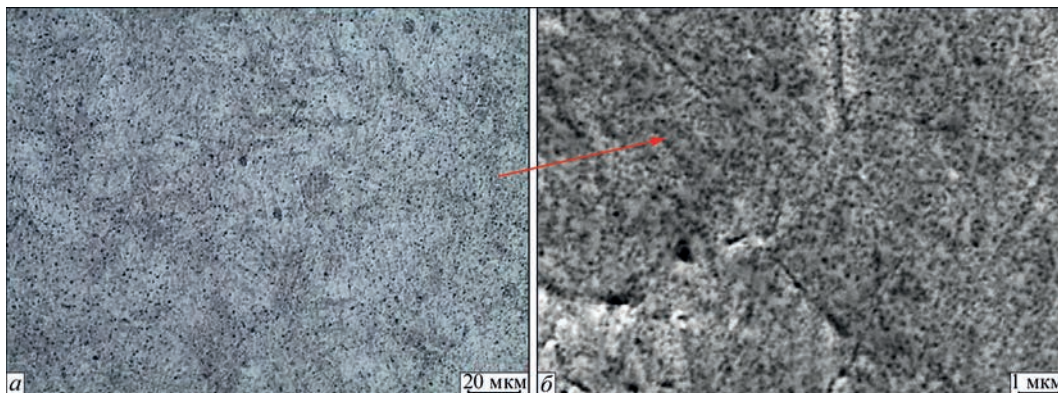


Рис. 11. Мікроструктура зразка, вирощеного мікроплазмовим наплавленням сплаву ХН50ВМТЮБ: *a* – $\times 500$ (оптична металографія); *б* – $\times 10\,000$ (електронна мікроскопія)

тів виглядала більш менш однорідною (рис. 11, а), вивчення їх структури на електронному мікроскопі дозволило встановити, що дендрити g-твердого розчину мають внутрішню будову із тонкими та переривчастими границями стінок блоків (рис. 11, б).

Як видно з вищенаведеної мікроструктури, дисперсійне зміцнення в процесі швидкого охолодження шарів мікроплазмового наплавленого металу або не відбувалося, або відбувалося в незначній мірі.

Обговорення результатів досліджень. Проведені технологічні дослідження показали, що для обраної групи порошоків (табл. 1) параметри режиму адитивного мікроплазмового наплавлення переважно залежать від фракційного складу присадного порошку. За умов використання порошкового мікроплазмового наплавлення з погонною енергією 85...90 Дж/мм і виділеної стисненою дугою теплової потужності ~800...900 Вт при адитивному вирощуванні металевих виробів відбувається повне розплавлення порошку. Структура металу характеризується явно вираженою шаруватістю; товщина шару, що наплавляється, становить 550...650 мкм.

За результатами проведення технологічних досліджень встановили, що послідовне наплавлення металу проявляється в утворенні рельєфу на бічній поверхні зразка (рис. 6). Спостерігаються напливи металу, які є чергуванням виступів і впадин, викликані, вочевидь, частковим стіканням рідкого металу по бічній поверхні. Розмір цих наплівів приблизно відповідає висоті шару металу, який наплавляють за один прохід. Одним зі шляхів мінімізації даного параметра є стабілізація адитивного мікроплазмового наплавлення за рахунок підбору його раціональних технологічних режимів. Іншим шляхом мінімізації даного параметра є зменшення висоти шару, який наплавляють за один прохід. Однак такий підхід знижує продуктивність 3D друку виробу та потребує окремих оптимізаційних підходів.

При багатшаровому мікроплазмовому наплавленні не виявлено таких дефектів, як поділ суміжних шарів усередині наплавлення через неповне розплавлення між шарами; затвердіння розплавленого матеріалу у вигляді сфер, а не суцільного шару; деформування через відмінність коефіцієнтів теплового розширення шарів. Зони сплавлення між шарами структурно не виявляються, спостерігається однорідна структура. Макроструктура кожного оплавленого шару є достатньо гомогенною, без утворення будь-яких дефектів, розтріскування. Методами оптичної та електронної мі-

кроскопії встановлено, що структура металу зразка є дендритною та містить як більш укрупнені, так і дрібніші зерна. Великі та дрібні дендрити утворюють колонії, розорієнтовані один відносно одного (наприклад, рис. 8). Формування кристалітів при послідовному наплавленні шарів металу у верхній та нижній частинах зразка – різне та визначається відмінностями в процесі кристалізації. Так, у нижній частині наплавленого металу тепловідведення є інтенсивнішим, оскільки здійснюється через підкладку основи, яка має досить добру теплопровідність. У верхній частині зразка тепловідведення менш інтенсивне, оскільки здійснюється переважно за рахунок теплового випромінювання, а теплопровідність попереднього наплавленого шару обумовлена застосованим присадним сплавом і переважно є низькою. Це зумовлює більш повільне охолодження металу у верхній частині зразка і, отже, призводить до певного зростання зерен.

Проведені методами електронної мікроскопії дослідження фазового складу наплавлених мікроплазмовим способом на підібраному раціональному режимі шарів сплаву НУФ-103 показали, що наявні тенденції незначного вигорання окремих легуючих складових (табл. 1 і 4). Так, вміст магнію зменшився з 0,6 до ~0,3 мас. %. Також на окремих ділянках спостерігається вигорання бору. Проте, в цілому, зменшення вмісту легуючих складових досліджених сплавів, що наплавляли, є досить обмеженим і не може розглядатися як значне.

Границю міцності σ_b , умовну границю плинності $\sigma_{0,2}$ і відносне подовження δ наплавленого металу при одновісному розтягуванні вимірювали на зразках завдовжки 30 мм, які вирізали по вертикалі одержаної пошаровим адитивним нарощуванням пластини (див. рис. 6). Міцність наплавленого металу оцінювали за результатами випробування за умов одновісного розтягування трьох зразків.

Проведені дослідження механічних властивостей (табл. 5) дозволили зробити висновок, що наплавлений адитивною технологією метал забезпечує достатньо високу міцність, яка досягає понад 600 МПа, де F_0 – площа поперечного перерізу

Таблиця 5. Механічні властивості металу, отриманого адитивним мікроплазмовим наплавленням порошку НУФ-103

Номер зразка	F_0	L_0	L_k	σ_b , МПа	σ_r , МПа	δ , %
1	7,15	20,02	20,49	606	474	3,165
2	7,16	19,78	20,78	627	510	5,056
3	7,15	22,14	22,94	618	462	3,613
Усереднене значення	–	–	–	617	482	3,95

зразка; L_0 і L_k – початкова і кінцева довжина зразка; δ – відносне подовження.

В останні роки все більшої актуальності набуває процес 3D друку деталей авіаційної техніки. Використання 3D принтерів значно знижує вартість створюваних виробів, підвищує гнучкість виробництва та прискорює виготовлення необхідних ремонтних комплектів деталей. Одним з найбільш складних завдань в цьому плані є 3D друк металевих деталей – як готових, так і з додатковою механічною обробкою. Застосування адитивного мікроплазмового наплавлення порошками металів для виготовлення 3D виробів авіаційної техніки дозволить значно підвищити продуктивність порівняно з існуючими методами. Так, застосування мікроплазмового наплавлення дозволить досягти продуктивності ~3...4 кг/год, у той час як лазерне наплавлення здатне досягти продуктивності до 1,5 кг/год. Крім того, мікроплазмове наплавлення дозволяє створювати композитні або функціонально градієнтні шари металу, що сприятиме економії матеріалів і дасть можливість створення в процесі 3D друку зносостійких поверхонь тертя при відносно м'якій основі. Обладнання, яке застосовується для мікроплазмового наплавлення, є значно дешевшим і простішим в обслуговуванні порівняно із лазерним. У цілому, не дивлячись на необхідність прикінцевої механічної обробки відповідальних функціональних поверхонь, застосування мікроплазмового наплавлення можна вважати перспективним напрямком 3D друку металевих деталей авіаційної техніки. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення впливу термічної обробки на структуру та властивості вирощених інноваційним 3D мікроплазмовим наплавленням виробів із розглянутих в роботі жароміцних нікелевих сплавів.

Висновки

1. Встановлено, що вибір режиму адитивного мікроплазмового наплавлення обраної групи порошків на основі заліза та нікелю переважно обумовлений грануляцією присадного порошку. При адитивному мікроплазмовому вирощуванні металевих виробів із товщиною стінки до 3 мм при застосуванні порошків на основі Fe і Ni із розміром фракції 40...100 мкм повне розплавлення порошку відбувається на режимах, які забезпечують погонну енергію 85...90 Дж/мм при виділеній стисненою дугою теплової потужності ~800...900 Вт.

2. Встановлено, що структура металу зразків, отриманих мікроплазмовим наплавленням, складається з дендритних колоній, розорієнтованих одна відносно іншої, які містять як відносно вели-

кі, так і дрібніші зерна. У нижньому шарі наплавленого металу формуються кристаліти меншого розміру з-за більш інтенсивного тепловідведення через сталеву підкладку основи. У верхніх шарах наплавленого металу формуються кристаліти більшого розміру через зменшення інтенсивності тепловідведення, чому сприяє застосування присадних сплавів із досить низькою теплопровідністю.

3. Механічні випробування на статичне розтягування зразків, вирізаних із наплавленого металу поперек валиків наплавлення, показали, що міцність сплаву НУФ-103 досягла понад 600 МПа при значеннях границі плинності понад 480 МПа і відносному подовженні близько 4 %. Такі результати можуть пояснюватися відсутністю дефектів наплавлення та низькою часткою вигорання легуючих елементів наплавленого сплаву.

4. Проведені дослідження показали принципову можливість формування дисперсних дендритних структур із зернами різної просторової орієнтації, структурну однорідність наплавлених шарів без явно виражених зон сплавлення, відсутність пор і розтріскування. Такі тенденції структуроутворення свідчать про перспективність подальшого використання адитивного мікроплазмового наплавлення для 3D друку деталей із корозійно-та жаростійких сплавів на основі заліза та нікелю, зокрема, деталей двигунів аерокосмічної техніки.

Список літератури/References

1. Moon, S.K., Tan, Y.E., Hwang, J., Yoon, Y.-J. (2014) Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures. *International J. of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, **1**, 223–228. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0028-x>
2. Chee, K.C., Kah, F.L., Chu, S.L. (2010) *Rapid prototyping: Principles and applications, third edition (3rd Edition)*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1142/6665>
3. Martinez, D.W., Espino, M.T., Cascolan, H.M. et al. (2022) A comprehensive review on the application of 3D printing in the aerospace industry. *Key Engineering Materials*, **913**, 27–34. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-94a9zb>
4. Singamneni, S., Lv, Y., Hewitt, A. et al. (2019) Additive manufacturing for the aircraft industry: A review. *J. of Aeronautics & Aerospace Engineering*, **8(1)**, 214. DOI: <https://doi.org/10.35248/2168-9792.19.8.215>
5. Gadagi, B., Lekurwale, R. (2021) A review on advances in 3D metal printing. *Materials Today: Proceedings*, **45(1)**, 277–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.436>
6. Matthews, N. (2018) Chapter fifteen – additive metal technologies for aerospace sustainment. *Aircraft Sustainment and Repair*, **2018**, 845–862. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100540-8.00015-7>
7. Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., Mehrpouya, M. (2019) Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *J. of Manufacturing Systems*, **53**, 124–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>
8. Yamazaki, T. (2016) Development of a hybrid multi-tasking machine tool: Integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, **42**, 81–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.193>
9. Peleshenko, S., Korzhyk, V., Voitenko, O. et al. (2017) Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *East-*

- ern-European J. of Enterprise Technologies, 3/1(87), 42–52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>
10. Kumar, P., Jain, N.K. (2020) Effect of material form on deposition characteristics in micro-plasma transferred arc additive manufacturing process. *CIRP J. of Manufacturing Science and Technology*, 30, 195–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.008>
 11. Wang, H., Jiang, W.H., Valant, M., Kovacevic, R. (2003) Microplasma powder deposition as a new solid free-form fabrication process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. of Engineering Manufacture*, 217(12), 1641–1650. DOI: <https://doi.org/10.1243/095440503772680578>
 12. Овчинников О.В., Дурягіна З.А., Романова Т.Є. та ін. (2021) Порошкові титанові сплави для адитивних технологій: структура, властивості, моделювання. Монографія. Київ, Наукова думка. Ovchinnikov, O.V., Duryagina, Z.A., Romanova, T.E. et al. (2021) *Powder titanium alloys for additive technologies: Structure, properties, modeling. Monograph*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
 13. Rezydent, N., Stepanova, N. (2023) Using the SolidWorks Flow Simulation CFD package to study the performance indicators of the cyclone-utilizer. *Modern technology materials and design in construction*, 33(2), 192–197. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-192-197>
 14. Akca, E., Trgo, E. (2015) Metallographic procedures and analysis – A review. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 3(2), 9–11. DOI: <https://doi.org/10.21533/pen.v3i2.51>
 15. Korzhyk, V., Gao, S., Khaskin, V. et al. (2024) Features of the stress-strain state of 3D metal objects produced by additive microplasma deposition of the powder of a Fe–Cr–Ni–B–Si system. *Applied Sciences*, 14, 4159. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14104159>
 16. Sidharth, Rana R., Pandey S. (2023) Configuring microplasma for material process optimization. *Materials Today: Proceedings*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.339>

APPLICATION OF MICROPLASMA DEPOSITION FOR 3D PRINTING OF AEROSPACE ENGINE PARTS

V.Yu. Khaskin¹, O.V. Ovchynnykov², K.M. Sukhyi², O.V. Zaichuk²

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

E-mail: khaskin1969@gmail.com

²Ukrainian State University of Science and Technologies. 2 Lazaryan Str., 49010, Dnipro, Ukraine

The work is devoted to establishing the basic technological regularities and features of the formation of characteristic structures of metal layers during additive microplasma deposition with powders of corrosion- and heat-resistant alloys and determining the prospects of this process for 3D printing of aircraft parts. It was established in the work that selection of additive microplasma deposition mode is mainly determined by the size of the filler powder fraction. The linear energy and thermal power of the compressed arc for growing metal products with a wall thickness of up to 3 mm using powders based on Fe and Ni with a fraction of 40...100 μm were determined. The main features of structure formation of the metal of samples produced by microplasma deposition, and their mechanical characteristics were determined, and the tendency to burnout of alloying elements of the deposited alloy was assessed. It is shown that despite the need for finishing machining of critical functional surfaces, the use of microplasma deposition can be considered a fairly promising direction for 3D printing of metal parts of aircraft equipment. 16 Ref., 5 Tabl., 11 Ref.

Keywords: 3D printing, nickel alloy, microplasma deposition, metal powders, technological modes, dendritic structure, heat dissipation. mechanical properties.

Отримано 05.03.2025

Отримано у переглянутому вигляді 24.03.2025

Прийнято 11.04.2025

НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ СЕМІНАРИ

3D ДРУК МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

27 травня 2025 р.

модератор семінару д.т.н., проф. В.В. Квасницький

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

28 травня 2025 р.

модератор семінару Ю.М. Посипайко

Запрошуємо взяти участь в роботі науково-практичних семінарів «3D друк металевих виробів» та «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану», які будуть проведені під час роботи XXIII Міжнародного промислового форуму, 27–29 травня 2025 р., м. Київ, Броварський проспект, 15.

Для участі в роботі семінарів необхідно надіслати заявку в Оргкомітет (участь безкоштовна).

Контрольні дати.

Подання заявок та тез/доповідей до 30.04.2025

Подання заявок без доповіді до 26.05.2025

Розсилка програм семінарів до 15.05.2025

Час та місце проведення семінарів буде наведено в програмах.

Вартість публікації.

Одна сторінка в збірці тез/доповідей – 150 грн.

Надання індексу DOI для тези/доповіді – 150 грн.

Надання сертифіката учасника – 100 грн.

Рахунок для оплати надається за запитом учасника.

До початку семінарів буде видано збірку тез/доповідей. Об'єм публікацій необмежений.

Збірку тез/доповідей в електронному вигляді буде розміщено за посиланням <http://ip.if.ua/ukr/3D-NDT-2025>.

Тривалість доповідей до 20 хвилин (15 хвилин на доповідь і 5 хвилин на обговорення).

Організатори.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Оргкомітет.

Олександр Зельніченко, тел.: (38044) 205-23-90

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

<http://ip.if.ua/ukr/3D-NDT-2025>

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ ВТОМНОМУ РУЙНУВАННЮ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ БРОНЬОВИХ СТАЛЕЙ ВИСОКОЇ ТВЕРДОСТІ

О.А. Гайворонський¹, В.Д. Позняков¹, А.В. Сафінський², А.В. Завдовєєв¹, Т.О. Алексеєнко¹, В.А. Ящук¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: paton39@ukr.net

²ДП «Житомирський бронетанковий завод». 12441, Житомирська обл., смт. Новогуївинське, вул. Дружби народів, 1
Досліджено вплив на опір втомі з'єднань броньових сталей високої твердості механічних ударних способів обробки – у порівнянні з низьким відпуском – при зварюванні високолегованими зварювальними матеріалами. Наведено результати випробувань циклічним навантаженням вигином зварних з'єднань марки броньової сталі HB500MOD, виконаних дротом марки ХОРДА307Ті (система легування 08Х20Н9Г7Т), які додатково піддавалися низькочастотному пошаровому проковуванню наплавленого металу при зварюванні, високочастотному проковуванню зони сплавлення та прилеглого металу ЗТВ, а також дробоструменевої обробці поверхні з'єднань після їх зварювання. Встановлено, що термічний відпуск з'єднань броньової сталі з високолегованим швом не сприяє підвищенню опору втомі. Найефективнішими способами підвищення опору втомі з'єднань є механічне високочастотне проковування або їх посиленна дробоструменева обробка після зварювання. Бібліогр. 10, рис. 4.

Ключові слова: броньова сталь високої твердості, зварні з'єднання, опір втомному руйнуванню, низький відпуск, механічне низькочастотне проковування, механічне високочастотне проковування, дробоструменева обробка

Вступ. Необхідний комплекс механічних і службових властивостей броньових сталей високої твердості досягається за рахунок спеціального рівня легування елементами, що зміцнюють ферит і підвищують прогартовуваність сталі (С, Cr, Ni, Mo, V, B), та відповідною термічною обробкою – гартуванням з наступним низьким відпуском. Високі показники міцності ($\sigma_{0,2} \geq 1200$ МПа) та твердості ($HB \geq 500$) у поєднанні з порівняно підвищеними пластичними властивостями ($d_5 \geq 8\%$), забезпечують належну кулестійкість конструкцій легкоброньованої техніки (ЛБТ). До броньових сталей високої твердості відносяться вітчизняна сталь марки 71 і її закордонні аналоги марок HB500MOD, ARMOX500, RAMOR500 та ін.

За системою легування броньові сталі високої твердості відносяться до класу середньовуглецевих легованих сталей. Зварювання зазначених сталей пов'язано з основною проблемою – високою ймовірністю утворення холодних тріщин у металі ЗТВ зварних з'єднань, що обумовлюється формуванням гартівних структур підвищеної крихкості [1, 2]. Це потребує додаткових технологічних рішень при виготовленні ЛБТ. Так, для попередження виникнення тріщин при зварюванні високолегованими матеріалами системи Mn–Si–Mo–Ti необхідно виконувати попередній підігрів зварних з'єднань, температура якого – в залежності від рівня легування сталі – може становити біль-

ше 150 °С. Якщо застосовується високолегований дріт системи Cr–Ni–Mo–Ti, то зварювання можливе без попереднього підігріву, за рахунок утворення в пришовному металі ЗТВ гартівних структур із суттєво нижчим рівнем внутрішніх напружень. Про це свідчать результати досліджень, докладно викладених у [3]. При такому варіанті зварювання в пришовній ділянці ЗТВ утворюється гартівна мартенситно-бейнітна структура металу з підвищеною здатністю до мікропластичного деформування без утворення мікротріщин. Зварюваність броньових сталей високої твердості в цьому напрямку досліджено достатньо детально та розроблено технології зварювання бронеконструкцій ЛБТ високолегованими матеріалами, які зараз застосовуються на виробництві та забезпечують високу якість зварних з'єднань.

Проте існує ще одна проблема при зварюванні високоміцних сталей. Пов'язана вона з обмеженою довговічністю та утворенням тріщин втомі в зварних з'єднаннях у процесі експлуатації виробів [4]. Особливо це стосується зварних з'єднань бронеконструкцій, які розташовані поблизу кріплень системи рушія виробу, що неодноразово спостерігалось при обстеженні цих ділянок. Зазначені тріщини розташовуються в зоні переходу від шва до основного металу і спочатку мають невеликий розмір (до 10 мм), але якщо їх своєчасно не відремонтувати, то вони в подальшому актив-

Гайворонський О.А. – <https://orcid.org/0000-0002-8146-7790>, Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>,

Завдовєєв А.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2811-0765>, Алексеєнко Т.О. <https://orcid.org/0000-0001-8492-753X>

© О.А. Гайворонський, В.Д. Позняков, А.В. Сафінський, А.В. Завдовєєв, Т.О. Алексеєнко, В.А. Ящук, 2025

но розвиваються, з переходом на основний метал (рис. 1). За радянських часів, коли броньові сталі були нижчої твердості та менш леггованими, а при зварюванні виробу ЛБТ застосувалися низьколегговані матеріали, для зниження рівня напружень і вірогідності утворення тріщин у зварних з'єднаннях при експлуатації обов'язковим було виконання низького відпуску виробу не пізніше 24 годин після його зварювання. Що стосується умов зварювання конструкцій ЛБТ високолеггованими матеріалами, то доцільність виконання низького відпуску до цього часу ще остаточно не визначено. Слід також зазначити, що для здійснення цієї технологічної операції необхідно спеціалізоване габаритне устаткування, значні витрати енергії та часу. При цьому витрати на виконання низького відпуску можуть складати до 30 % загальної вартості бронеконструкцій.

На даний час відомі менш енергозатратні технологічні способи, що дозволяють підвищувати опір втомі зварних з'єднань при довготривалій експлуатації, вони науково обґрунтовані та перевірені при виготовленні цивільних металоконструкцій [5–7]. Серед них найпоширенішими є деформаційні технології, при яких за рахунок введення механічної енергії відбувається пластичне деформування ділянок зварного з'єднання та подрібнюється структура металу. Під впливом деформації можливо також суттєво зменшити залишкові напруження в зварному з'єднанні та рівень їх концентрації в зоні переходу від шва до основного металу. Всі ці позитивні зміни повинні сприяти підвищенню тріщиностійкості зварних з'єднань броньових сталей при циклічних навантаженнях і їх довговічності в цілому. До таких деформаційних технологій можна віднести способи механічної ударної обробки, серед яких найпоширенішими є низькочастотне (до 10 Гц) пошарове проковування металу шва при зва-



Рис. 1. Тріщина втомі в зварному з'єднанні виробу ЛБТ після довготривалої експлуатації

рюванні з'єднань і післязварювальне високочастотне (більше 5 кГц) проковування зони сплавлення та ділянки перегріву ЗТВ. До ударних способів можна також віднести дробоструменеву обробку металу, включаючи зварні з'єднання, яка є прийнятною технологічною операцією при виготовленні ЛБТ.

У зв'язку з цим, виконання досліджень із визначення можливості застосування енергозберігаючих технологій обробки без застосування низького відпуску для підвищення тріщиностійкості та довговічності з'єднань броньових сталей високої твердості є актуальними.

Метою даної роботи було проведення порівняльної оцінки впливу механічних ударних способів обробки зварних з'єднань броньових сталей високої твердості, при виготовленні яких застосовуються високолегговані зварювальні матеріали, на їх опір утворенню тріщин втомі. Це дозволить остаточно визначитися з доцільністю виконання низького відпуску і вибором ефективних технологічних операцій при сучасному виробництві ЛБТ для підвищення їх ресурсу експлуатації.

Матеріали та методи досліджень. В якості об'єкта досліджень використовували зварні з'єднання типової броньової сталі високої твердості марки НВ500MOD наступного складу, мас. %: 0,26 С; 0,21 Si; 0,78 Mn; 0,42 Cr; 0,74 Ni; 0,27 Mo; 0,06 V; 0,002 В. Для порівняльних випробувань підготовлювали стикові з'єднання розміром 400×480 мм завтовшки 10 мм з V-подібною формою розробки, які виконували з повним проваром і підварюванням кореня із зворотної сторони. З'єднання зварювали механізованим способом у суміші захисних газів (82 % Ar + 18 % CO₂) високолеггованим дротом вітчизняного виробництва марки ХОРДА 30 7Ті (аналог дроту Св-08Х20Н9Г7Т) діаметром 1,2 мм на режимі: зварювальний струм 160...180 А, напруга на дузі 26...28 В, швидкість зварювання 12...15 м/год. При їх зварюванні попередній підігрів не застосовували. Для порівняння впливу низького відпуску, при зварюванні на аналогічних режимах низьколеггованим дротом Св-10ГСМТ (технологія радянських часів) попередній підігрів металу становив 100 °С.

При підготовці зварних з'єднань до їх випробувань були застосовані наступні технологічні операції (способи) обробки:

№ 1 (базовий) – без низького відпуску з'єднання та будь-яких ударних способів обробки;

№ 2 – низький відпуск (230 °С, 3 години) через 15...20 годин після зварювання;

№ 3 – низькочастотне проковування (до 10 Гц) шарів наплавленого металу в процесі зварювання;

№ 4 – високочастотне проковування (більше 5 кГц) через 4 доби після зварювання;

№ 5 – дробоструменева обробка через 4 доби після зварювання з'єднання за прийнятою технологією виробника ЛБТ;

№ 6 – посилена додаткова дробоструменева обробка ділянки металу шва та ЗТВ вздовж зварного з'єднання.

Особливості застосування ударних способів обробки зварних з'єднань були наступними. Так, низькочастотне пошарове проковування наплавленого металу виконували в процесі зварювання з'єднань після їх охолодження до температури 100...50 °С. Оскільки товщина металу складала 10 мм і зварювання стикового з'єднання виконувалося у три шари, то проковували тільки 2-й шар шва (до зміни характеру малюнку поверхні наплавленого металу на 70...90 %). Кореневий та останній шари були без проковування, як це рекомендовано при використанні даного способу. Для реалізації процесу проковування застосовували звичайний електромеханічний інструмент із діаметром на вістрі бійка 3...5 мм. При цьому швидкість обробки поверхонь шарів шва становила 100 мм за 1 хв.

Високочастотне (понад 5 кГц) проковування виконували на поверхні зони сплавлення та прилеглого металу ЗТВ зварного з'єднання, ширина обробленої ділянки становила 2,0...2,5 мм. При цьому використовували спеціалізований інструмент за розробленими рекомендаціями щодо застосування цього способу [7, 8]. Швидкість переміщення інструмента при проковуванні становила 1 мм/с. При цьому на ділянці обробки утворювалась характерна канавка округлої форми завглибшки 0,3 мм.

Дробоструменева обробка є технологічною операцією при виготовленні виробів ЛБТ на спеціалізованих підприємствах, що обов'язково виконується вже на готовому виробі перед його

фарбуванням. У нашій роботі дробоструменеву обробку зварних з'єднань виконували в умовах ДП «ЖБТЗ» із використанням обладнання та технології обробки, що застосовуються в серійному виробництві. При цьому діаметр дробу становив 2...3 мм. Обробку дробом проводили з лицьової та зворотної сторін по всій поверхні зварених пластин за звичайною технологією (№ 5) та при посиленій додатковій обробці саме поверхні стику з'єднання (№ 6). При цьому швидкість обробки становила 100 мм за 1 хв.

Потім з кожного стикового з'єднання, підготовленого зазначеним способом (№№ 1–6), вирізали по 3 зразки розміром 480×120 мм, які випробували при консольному згинанні за симетричного циклічного навантаження з максимальними напруженнями циклу 60 МПа відповідно до загальноприйнятих методів випробувань на довговічність зварних з'єднань [9, 10]. Для цього використовували спеціалізовану машину для випробування на опір втомі типу УМП-1. Частота циклічного навантаження становила 14 Гц. Критерієм оцінки була кількість циклів навантаження (N), за яких у зварному з'єднанні утворювалась критична тріщина втомі завдовжки 3 мм. Якщо характерних ознак тріщини протягом 2 мільйонів циклів не було виявлено, навантаження зупинили і це було показником найліпшої опірності зварних з'єднань до утворення тріщин втомі.

Металографічні дослідження зварних з'єднань виконували з використанням світлової мікроскопії (Versamet-2, Neophot-32), мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі Leco M-400.

Результати досліджень та їх обговорення. Узагальнені результати порівняльних випробувань зварних з'єднань на втому при циклічному навантаженні вигином представлені на рис. 2. Слід зазначити, що при всіх розглянутих варіантах зварювання та обробок тріщини втомі зароджувались в

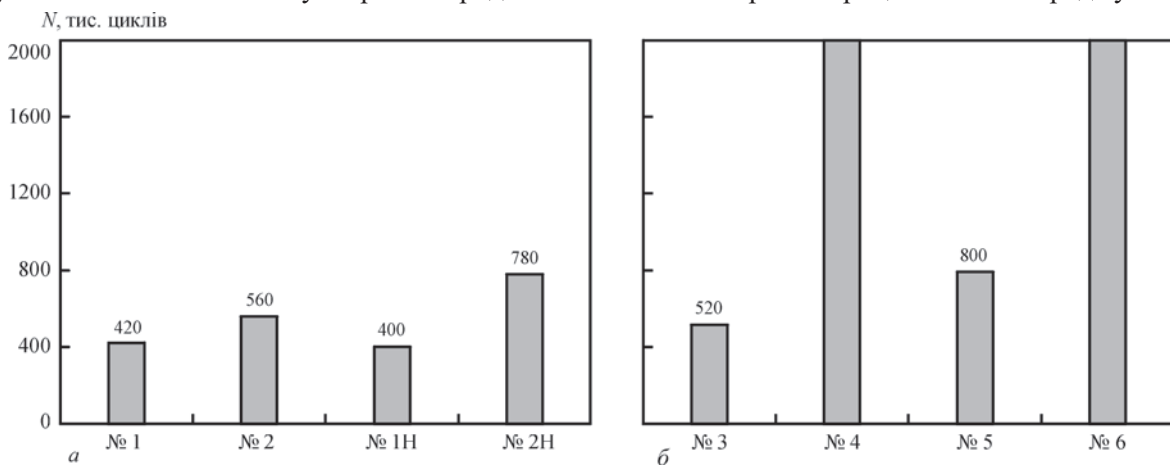


Рис. 2. Опірність зварних з'єднань броньової сталі HB 500 MOD до утворення тріщин втомі, виконаних дротом ХОРДА 307 Ті та дротом Св-10ГСМТ (позначка Н), №№ 1–6 – способи обробки: а – вплив низького відпуску; б – вплив ударних способів обробки

місці переходу від шва до основного металу та в подальшому розвивалися вглиб зварного з'єднання в металі ЗТВ (рис. 3).

Як видно з наведених даних на рис. 2, а, низький відпуск з'єднань з високолегованим швом, який виконувався після вилежування зразків протягом 15...20 год (№ 2), несуттєво впливає на підвищення їх довговічності. Кількість циклів навантажень до утворення тріщин втоми збільшилась на 30 % (з 420000 до 560000 відповідно), а при зварюванні низьколегованим матеріалом (№ 2Н) показник підвищився майже в 2 рази (з 400000 до 780000 циклів). У вихідному стані без термічної обробки довговічність з'єднань при зварюванні високо- і низьколегованими матеріалами приблизно однакова (№ 1 і № 1Н). Дещо більша опірність, приблизно на 5 %, до утворення тріщин втоми з'єднань, виконаних дротом ХОРДА 307 Ті, пов'язана з особливостями формування загартованої структури в металі ЗТВ при застосуванні високолегованого дроту.

Незначне підвищення опору до втомного руйнування зварних з'єднань сталі з високолегованим

швом пов'язано, на нашу думку, з окрихчуванням зони сплавлення при термічному відпуску внаслідок розвитку процесів дифузії вуглецю. Сформовані крихкі прошарки невеликі за розміром (до 5 мкм) (рис. 4), але їх наявність достатня для зниження опірності металу до утворення тріщин втоми під дією зовнішнього навантаження.

Пошарове проковування наплавленого металу в процесі зварювання сприяло підвищенню довговічності з'єднання всього на 25 %. Кількість циклів до утворення тріщин втоми збільшилась з 420 до 520 тис. (№ 1 та № 3). Слід, однак, врахувати, що при зварюванні високолегованими матеріалами даний спосіб обробки може застосовуватися з метою зниження деформацій у з'єднаннях і збереження геометричних розмірів бронеконструкції.

Найбільший вплив на підвищення довговічності зварних з'єднань броньової сталі НВ 500 MOD з високолегованим швом спричинило високочастотне проковування ділянки зони сплавлення та прилеглому металу ЗТВ. При цьому тріщина втоми у зварному з'єднанні не утворювалась навіть при навантаженні 2 млн циклів і більше (при 3 млн циклів випробування припиняли).

Металографічними дослідженнями встановлено, що структура зварних швів броньової сталі у вихідному стані є аустенітно-феритною, з мікротвердістю в центрі шва $HV = 2210...3660$ МПа. У металі ділянки перегріву ЗТВ формується бейнітно-мартенситна (Б-М) структура з мікротвердістю $3360...4640$ МПа та розміром пакетів $40...200$ мкм. Структура в основному металі також Б-М, але нижчої твердості ($3220...4010$ МПа) і більш дисперсна ($25...70$ мкм). Після високочастотного проковування в прилеглий ділянці шва, що була деформована, підвищується мікротвердість металу в середньому у 1,2 рази (до $3360...4210$ МПа). Спостерігається подрібнення структури до $10...30$ мкм. Аналогічні зміни відбулися й на ділянці перегріву ЗТВ. На глибині до

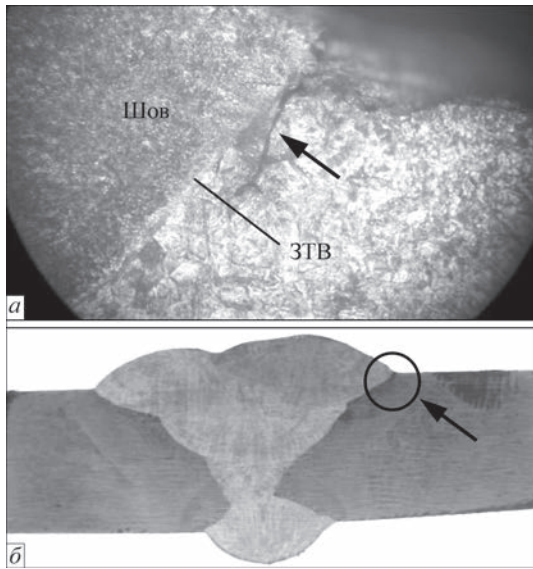


Рис. 3. Типове утворення та розвиток тріщини втоми (а, $\times 100$) у зварних з'єднаннях (б) броньової сталі НВ 500 MOD

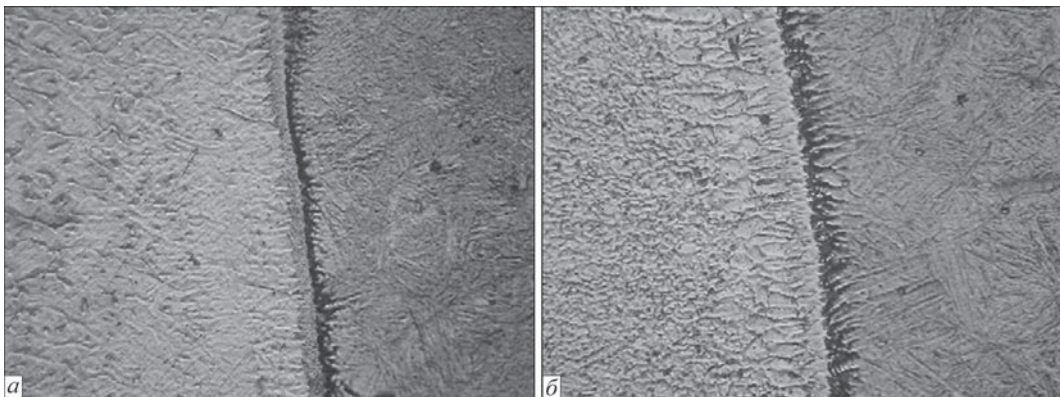


Рис. 4. Типова зона сплавлення в зварних з'єднаннях сталі НВ 500 MOD з високолегованим швом ($\times 500$): а – у середній частині з'єднання; б – у верхній частині з'єднання

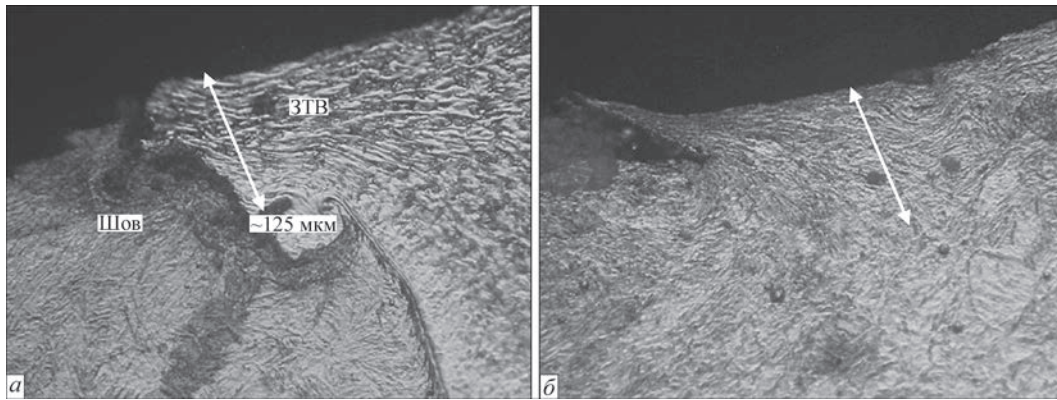


Рис. 5. Зміни в структурі металів шва і ЗТВ (а) після високочастотного проковування по лінії сплавлення зварного з'єднання та в основному металі (б) ($\times 500$)

125 мкм розмір пакетів становить вже 25...50 мкм (зменшення в 4 рази), а мікротвердість підвищується до 4640...5520 мкм. Типові зміни в структурі металу після високочастотного проковування показано по лінії сплавлення на рис. 5, а. Для порівняння на рис. 5, б наведено зміни структури при проковуванні саме основного металу. У ньому також спостерігається подрібнення структури з 25...70 до 15...25 мкм і підвищення мікротвердості з 3220...4010 до 4210...4880 МПа на глибину до 125 мкм.

Дробоструменева обробка усієї поверхні пластин після зварювання за звичайною технологією підготовки ЛБТ (№ 5) дозволяє підвищити опір втомному руйнуванню з'єднання майже в 2 рази, до 800 тис. циклів. Після посиленої додаткової обробки (№ 6) власне з'єднання, випробування на втому не спричинили утворення тріщин навіть при навантаженні 2 млн циклів і більше, як і у випадку застосування високочастотного проковування. Металографічних досліджень при цьому варіанті обробки не проводили, проте можна припустити, що в структурі металу з'єднань відбуваються аналогічні зміни структури. Фізика процесів їх впливу на формування властивостей металу при обох способах приблизно однакова. У результаті обробки відбувається наклеп металу шва і ЗТВ, а в приповерхневому шарі з'єднань формуються напруження стиску. Такі позитивні зміни сприяють суттєвому підвищенню довговічності зварних з'єднань броньової сталі НВ 500 MOD.

Висновки

1. Низький відпуск зварних з'єднань броньової сталі високої твердості марки НВ 500 MOD, виконаних низьколегованими матеріалами типу Св-10ГСМТ з попереднім підігрівом, дозволяє підвищити в 2 рази їх опір втомному руйнуванню. При зварюванні з'єднань броньової сталі без попереднього підігріву високолегованим дротом

ХОРДА 307 Ті застосування низького відпуску не є ефективне, що пов'язано з окрихчуванням зони сплавлення при термічному відпуску внаслідок розвитку процесів дифузії вуглецю.

2. Пошарове проковування наплавленого металу під час зварювання броньової сталі високої твердості із застосуванням високолегованих матеріалів сприяє підвищенню довговічності опору втомному руйнуванню з'єднань на 25 %. Це – незначне підвищення, але даний спосіб обробки ефективніше може впливати на зниження рівня деформацій у з'єднаннях і збереження геометричних розмірів бронеконструкції при їх виготовленні.

3. Суттєво підвищити довговічність зварних з'єднань броньової сталі НВ 500 MOD без утворення тріщин втомі при навантаженні 2 млн циклів і більше можливо за рахунок високочастотного проковування зони сплавлення та пришовного металу ЗТВ з'єднань або при їх посиленій дробоструменевій обробці. При цьому в приповерхневому шарі металу на глибину до 125 мкм відбувається подрібнення структури в декілька разів, утворюються напруження стиску на ділянці обробки, що позитивно впливає на опір зварних з'єднань втомному руйнуванню.

Список літератури

1. Єфіменко М.Г., Радзівілова Н.О. (2003) *Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань*. Харків, НТУ ХП.
2. Анохов А.Е., Корольков П.М. (2006) *Зварювання та термічна обробка в енергетиці*. Київ, Екотехнологія.
3. Гайворонський О.А., Позняков В.Д., Берднікова О.М. та ін. (2020) Вплив низькотемпературного відпуску на структуру та властивості зварних з'єднань високоміцної сталі 30Х2Н2МФ. *Автоматичне зварювання*, 6, 23–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.06.04>
4. Дронов В.С., Головін С.А. (2004) Обмежена довговічність і тріщиностійкість сталей високої і середньої міцності. *Матеріалознавство*, 12, 41–47.
5. Патон Б.С. (2000) Сучасні напрямки підвищення міцності і ресурсу зварних конструкцій. *Автоматическая сварка*, 9-10, 3–9.
6. Лашенко Г.І., Демченко Ю.В. (2008) *Енергозберігаючі технології післязварювальної обробки металокопункцій*. Київ, Екотехнологія.

- Кныш В.В., Кузьменко А.З. (2005) Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой. *Сварщик*, **2**, 19–21.
- Bonnen, J.J., Mandapati, R., Kang, H. et al (2009). Durability of advanced high strength steel gas metal arc welds. *SAE International J. of Materials and Manufacturing*, **2(1)**, 155–171.
- Ковальчук В.С., Кныш В.В., Позняков В.Д., Касаткин С.Б. (2007) Способ повышения циклической долговечности и ресурса сварных стальных конструкций. *Автоматическая сварка*, **3**, 44–46.
- Cabrilo, A., Sedmak, A., Burzic, Z., Perkovic, S. (2019) Fracture mechanics and fatigue crack propagation in armor steel welds. *Engineering Failure Analysis*, **106**, 104155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104155>
- 30Kh2N2MF. *The Paton Welding J.*, **6**, 20–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.06.04>
- Dronov, V.S., Golovin, S.A. (2004) Limited durability and crack resistance of high- and medium-strength steels. *Materialoznavstvo*, **12**, 41–47 [in Ukrainian].
- Paton, B.E. (2000) Modern trends toward increase in strength and life of welded structures. *The Paton Welding J.*, **9-10**, 3–8.
- Lashchenko, G.I., Demchenko, Y.V. (2008) *Energy-saving technologies for post-welding processing of metal structures*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Ukrainian].
- Knysh, V.V., Kuzmenko, A.Z. (2005) Increasing the fatigue resistance of welded joints by high-frequency mechanical peening. *Svarshchik*, **2**, 19–21.
- Bonnen, J.J., Mandapati, R., Kang, H., Iyengar, R.M. et al. (2009) Durability of advanced high strength steel gas metal arc welds. *SAE Intern. J. of Materials and Manufacturing*, **2(1)**, 155–171.
- Kovalchuk, V.S., Knysh, V.V., Poznyakov, V.D., Kasatkin, S.B. (2007) Method for increasing cyclic and service life of welded steel structures. *The Paton Welding J.*, **3**, 37–38.
- Cabrilo, A., Sedmak, A., Burzic, Z., Perkovic, S. (2019) Fracture mechanics and fatigue crack propagation in armor steel welds. *Engineering Failure Analysis*, **106**, 104155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104155>

References

- Efimenko, M.G., Radzivilova, N.O. (2003) *Metal science and thermal processing of welded joints*. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
- Anokhov, A.E., Korolkov, P.M. (2006) *Welding and heat treatment in power engineering*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Ukrainian].
- Gaivoronskyi, O.A., Poznyakov, V.D., Berdnikova, O.M. et al. (2020) Influence of low-temperature tempering on structure and properties of welded joints of high-strength steel

WAYS TO INCREASE THE FATIGUE FRACTURE RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF HIGH-HARDNESS ARMORED STEELS

O.A. Gaivoronsky¹, V.D. Poznyakov¹, A.V. Safinsky², A.V. Zavdoveev¹, T.O. Alekseenko¹, V.A. Yashchuk¹

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

E-mail: paton39@ukr.net

²DP «Zhytomyr armored tank plant». 1 Druzhby Narodiv Str., 12441, Zhytomyr region, Novogyvinske urban settlement, Ukraine

The influence of mechanical impact methods of processing on fatigue resistance of joints of high-hardness armored steels, compared to low tempering, in welding with high-alloy welding materials was studied. The paper presents the results of tests by cyclic out-of-plane bending of welded joints of armored steel of HB 500 MOD grade, made with wire of KHORDA 307Ti brand (08Kh20N9G7T alloying system), additionally subjected to layer-by-layer low-frequency peening of the deposited metal during welding, high-frequency peening of the fusion zone and adjacent metal of the HAZ and shot peening of the joint surface after their welding. It is established that thermal tempering of armored steel joints with a high-alloy weld does not contribute to increase in fatigue resistance. The most effective methods of increasing the fatigue resistance of the joints are mechanical high-frequency peening or enhanced shot peening after welding. 10 Ref., 4 Fig.

Keywords: high-hardness armored steel, welded joints, fatigue fracture resistance, low-temperature tempering, mechanical low-frequency peening, mechanical high-frequency peening, shot peening

Отримано 18.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 21.01.2025

Прийнято 17.02.2025

КОНФЕРЕНЦІЯ

«Зварювання та споріднені технології для відновлення України»

м. Київ, 27 листопада 2025 р.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Тематика конференції:

- дугові процеси зварювання та наплавлення;
- променеві та плазмові технології зварювання, наплавлення і нанесення покриттів;
- гібридні процеси зварювання;
- 3D адитивні технології отримання металевих виробів;
- спеціальна електрометалургія;
- матеріалознавство в зварюванні та споріднених технологіях;
- неруйнівний контроль та технічна діагностика.

Контакти

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

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

тел./факс: (38044) 205-23-90, E-mail: journal@paton.kiev.ua

ТЕХНОЛОГІЧНА МІЦНІСТЬ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 25ХНЗМФА ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ

А.К. Царюк, В.Ю. Скульський, В.П. Єлагин, І.Г. Осипенко

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

Досліджено зварюваність сталі 25ХНЗМФА і встановлено вимоги для можливості її застосування при виготовленні зварних конструкцій важкого машинобудування. Дослідження зварюваності сталі 25ХНЗМФА показало, що при її зварюванні утворюються гарячі та холодні тріщини. Для попередження утворення холодних тріщин у зварних з'єднаннях зварювання необхідно виконувати з попереднім і супутнім підігрівом до 250...300 °С і обов'язковим післязварювальним відпуском при 570 °С. Гарячі тріщини утворюються при зварюванні кореневого шару металу шва, що пов'язано зі значною часткою основного металу (> 50 %) при змішуванні з наплавленим металом. Для можливості виготовлення зварних конструкцій із цієї сталі необхідно застосовувати тільки автоматичне зварювання під флюсом у вузьке розкриття крайок і видаляти кореневий шар з внутрішньої сторони зварного з'єднання. При неможливості видалення кореневого шва зварні конструкції зі сталі 25ХНЗМФА до експлуатації не допускаються. Бібліогр. 17, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: складнолеговані сталі, зварювання під флюсом у вузьке розкриття крайок, зварюваність, холодні тріщини, гарячі тріщини, попередній і супутній підігрів, структура.

Вступ. Для виготовлення великогабаритних товстостінних конструкцій у важкому машинобудуванні використовуються складнолеговані корпусні сталі Cr–Ni–Mo композиції типу 20ХНМФА, 20ХНЗМА, 25ХНЗМФА та ін. [1]. При високих показниках міцності ці сталі після відповідної термічної обробки мають необхідну пластичність і в'язкість. Проте схильність до гартування і високий рівень механічних властивостей обумовлюють ряд труднощів при їх зварюванні. Це в першу чергу стосується утворення гарячих і холодних тріщин та отримання рівномічних зварних з'єднань [2]. Для вирішення цієї проблеми необхідно не тільки правильно встановити тепловий режим зварювання та вибрати зварювальні матеріали, а й грамотно підібрати спосіб зварювання, який забезпечує якість зварних з'єднань. При виготовленні перших корпусів гідроциліндрів зі сталі 20ХНЗМА для пресів потужністю 30 тис. т на АТ «НКМЗ» (м. Краматорськ) основним способом зварювання було електрошлакове зварювання (ЕШЗ). Проте виготовлені циліндри із застосуванням ЕШЗ не мали достатньої надійності. При експлуатації в умовах змінного навантаження в зварних з'єднаннях утворювались тріщини, які спричиняли руйнування гідроциліндрів. Природа утворення цих тріщин у значній мірі визначається особливостями способу ЕШЗ. Причини утворення дефектів і недоліки ЕШЗ складнолегованих сталей досліджені в [3–5].

Дослідження натурних моделей корпусів циліндрів гідропреса, виконаних ЕШЗ і під флюсом

у вузьке розкриття крайок зі сталі 20ХНЗМА показали, що найбільш перспективним способом зварювання є автоматичне зварювання під флюсом у вузьке розкриття крайок. Цей спосіб [6, 7] забезпечує мінімальне проплавлення зварюваних крайок і розбавлення металу шва основним металом, вузьку зону термічного впливу, однорідність хімічного складу та механічних властивостей по висоті розкриття крайок, обмежений об'єм наплавленого металу шва при його дрібнозернистій структурі та мінімальні залишкові напруження й деформації. Крім того, на відміну від ЕШЗ, при зварюванні під флюсом у вузьке розкриття крайок одноразовий високий відпуск забезпечує достатньо повне зниження залишкових напружень і поліпшення структури та властивостей зварних з'єднань. У той же час після ЕШЗ необхідно здійснювати високотемпературну термічну обробку, причому для складнолегованих сталей – у кілька етапів [6].

Таким чином, зварювання під флюсом у вузьке розкриття крайок масивних товстостінних виробів із складнолегованих сталей не тільки забезпечує високу якість зварних з'єднань при високій ефективності процесу, а й є одним із резервів економії енергетичних ресурсів, що дуже важливо у теперішній час.

Для виготовлення гідроциліндрів пресового устаткування необхідно використовувати великогабаритні циліндричні ковані заготовки товстого металу (завтовшки ≥ 500 мм) із високоміцних сталей, які зварюються поясними швами. При цьому перспективним варіантом можливо вважати вико-

Царюк А.К. – <https://orcid.org/0000-0002-5762-5584>, Скульський В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-4766-5355>,

Єлагин В.П. – <https://orcid.org/0000-0002-4335-5130>, Осипенко І.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-6645-7853>

© А.К. Царюк, В.Ю. Скульський, В.П. Єлагин, І.Г. Осипенко, 2025

ристання сталі 25ХНЗМФА, оскільки підвищений вміст вуглецю (0,25 %) і нікелю (більше 3,5 %) забезпечує достатню прогартовуваність по всій товщині, що сприяє стабільності показників міцності та службових властивостей товстого металу. Але відомості щодо технологічної міцності зварних з'єднань цієї сталі дуже обмежені.

Метою даної роботи було дослідження зварюваності сталі 25ХНЗМФА і встановлення можливості застосування її для відповідальних зварних конструкцій важкого машинобудування.

Матеріали та методики проведення експериментів і досліджень. Хімічний склад сталі 25ХНЗМФА представлено у табл. 1. Для одержання зварних з'єднань використовували сполучення дроту Св-08ХН2ГМЮ (табл. 1) і флюсу АН-17 [8], яке знаходить застосування в енергетичному машинобудуванні при виготовленні виробів із низьколегованих сталей.

Закономірності формування структури сталі 25ХНЗМФА в залежності від термічних умов зварювання вивчали за допомогою експериментально одержаної термокінетичної діаграми перетворення аустеніту [9]. Для моделювання відповідних структурних змін та імітації термічних циклів зварювання застосовано швидкодіючий дилатометр конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона. У експериментах спеціальні дослідні зразки нагрівали до температури 1300...1350 °С із подальшим охолодженням відповідно до термічних циклів ручного зварювання, автоматичного зварювання під флюсом (із підігрівом і без підігріву), електрошлакового зварювання, а також зварювання зі значним відведенням

тепла. Відлік часу охолодження розпочинався від температури A_{C3} , яку заздалегідь визначали на дилатометрі Шевенара. Після повного охолодження зразка проводився металографічний аналіз та вимір твердості.

Мікроструктурні дослідження виконували на світловому мікроскопі Neophot-32, оснащеним оптичним модулем Olympus P-5060 з комп'ютерним керуванням процесом фіксації зображень. Виявлення мікроструктури у полірованих шліфах проводили електролітичним травленням у 10 %-му водному (дистильована вода) розчині хромової кислоти на режимі: напруга 12...15 В, час травлення 10...15 с; у процесі підготовки мікрошліфів здійснювали переполіровку протравлених поверхонь на суцні з нанесенням на нього порошкового оксиду хрому. Для травлення макрошліфів зварних з'єднань використовували 30 %-ний розчин хлорного заліза ($FeCl_3$). Твердість за методом Віккерса вимірювали на твердомірі ТП-5 при навантаженні 10 кг.

Для якісної оцінки схильності зварних з'єднань до утворення тріщин застосовували стикові з'єднання типу технологічних проб Ліхайдського університету (проба «L») [10] з видозміненою конфігурацією крайок – з U- на X-подібну (рис. 1). Коригування конструктивних елементів проби здійснено з метою можливості виконання зварювання під флюсом, оскільки оригінальна проба «L» передбачена для ручного дугового зварювання. Випробування проводились при різних температурах попереднього підігріву, але при постійних умовах зварювання: дріт діаметром 2,0 мм,

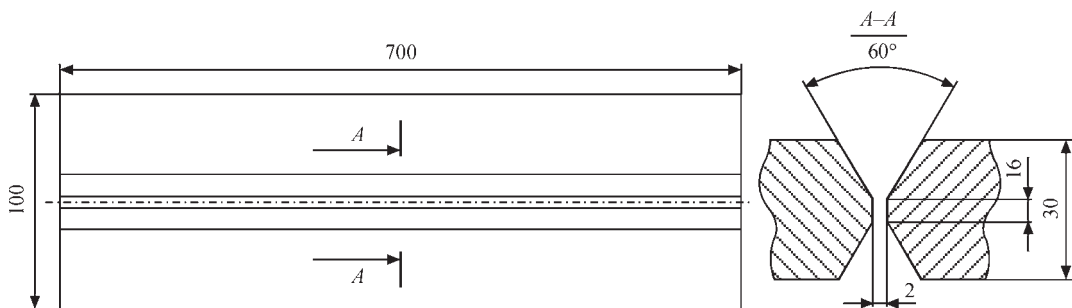


Рис. 1. Технологічна проба

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваної сталі та металу, наплавленого застосованим зварювальним дротом, ваг. %

Марка сталі/дроту	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P
								не більше	
Сталь									
25ХНЗМФА ТУ 108.11.917-87	0,20...0,25	0,17...0,37	0,20...0,50	1,40...1,80	3,00...3,75	0,30...0,50	0,08...0,15	0,020	0,020
25ХНЗМФА	0,25	0,26	0,36	1,60	3,50	0,33	0,15	0,020	0,020
Дріт									
Св-08ХН2ГМЮ ГОСТ 2246-70	0,06...0,11	0,25...0,55	1,00...1,40	0,70...1,10	2,00...2,50	0,40...0,65	–	0,030	0,030
Св-08ХН2ГМЮ	0,11	0,31	0,95	0,80	2,00	0,60	–	0,02	0,025

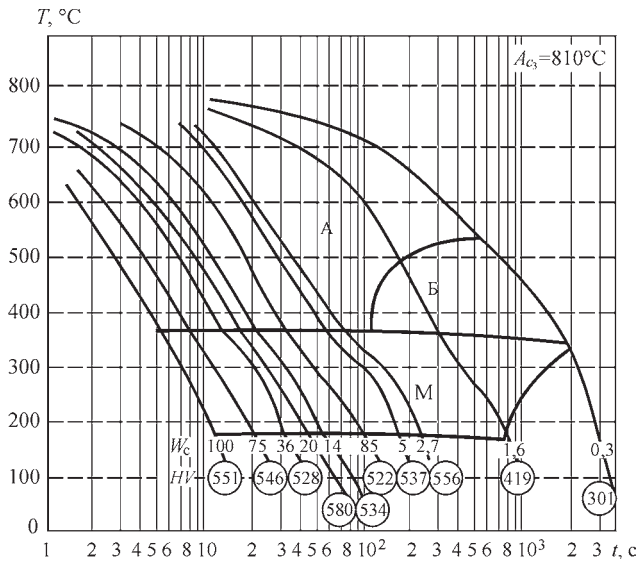


Рис. 2. Термокінетична діаграма перетворення аустеніту в сталі 25XНЗМФА

зварювання одностороннє, $I_{зв} = 320...340$ А, $U_d = 36...38$ В, $V_{зв} = 18$ м/год. Швидкість охолодження задавали температурою підігріву в інтер-

валі 20...300 °С. Для кожної температури підігріву зварювали по 3 зразки.

Температуру попереднього підігріву, достатню для запобігання утворенню холодних тріщин, оцінювали на основі аналізу побудованої термокінетичної діаграми перетворення аустеніту.

Результати досліджень та їх обговорення. Зазвичай здатність гартівних сталей до зварювання оцінюється на основі аналізу їх реакції на термодеформаційний цикл зварювання і характеру утворених фаз. Такі закономірності описуються результатами дилатометричних досліджень. Так, на рис. 2 представлена термокінетична діаграма перетворення аустеніту в сталі 25XНЗМФА, побудована при швидкостях охолодження в інтервалі 600...500 °С ($w_{6/5}$) в межах 0,3...100 °С/с.

У вихідному стані мікроструктура відпущеної сталі складається переважно з сорбіту (рис. 3, а) з твердістю 246 HV. При нагріві до аустенітного стану та охолодженні у вказаному діапазоні швидкостей охолодження фазове перетворен-

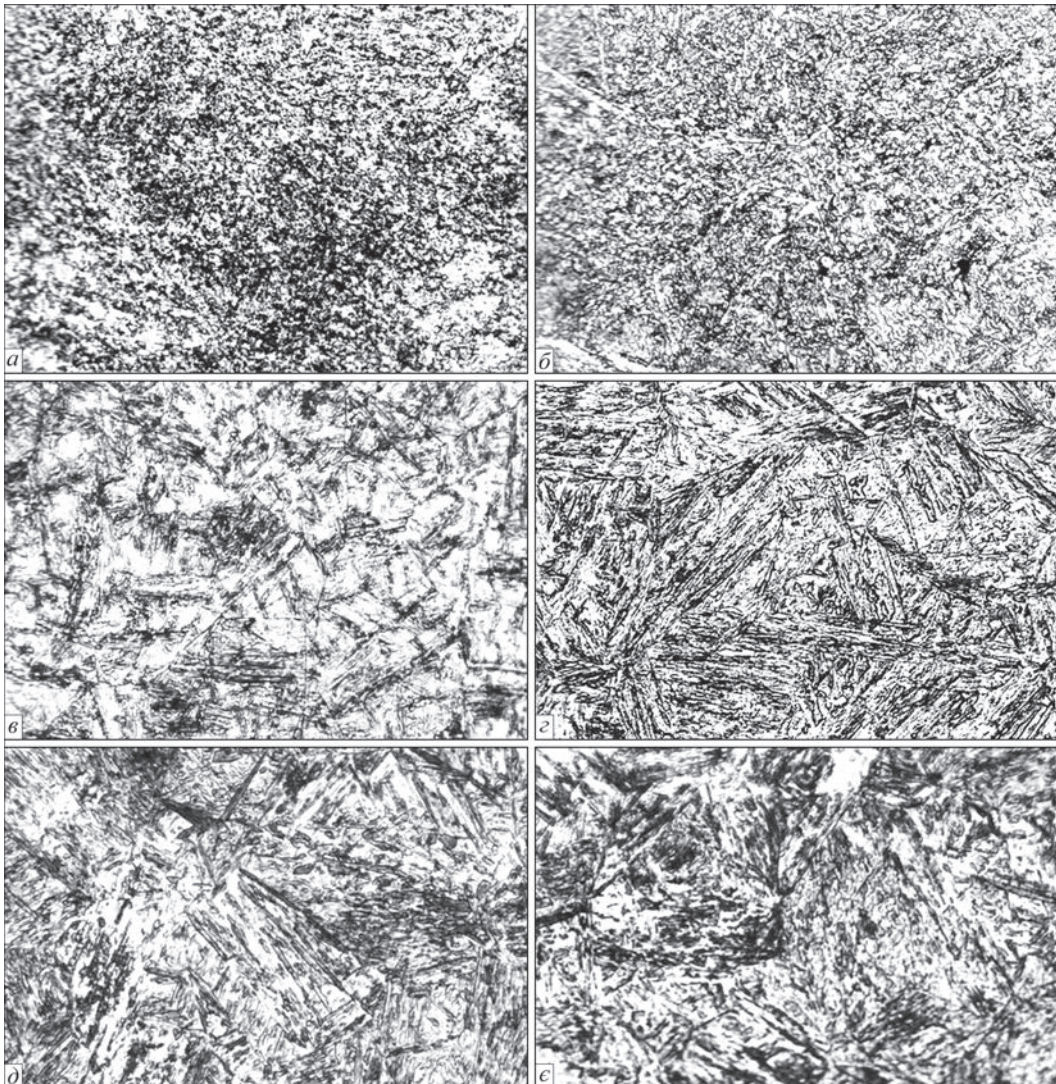


Рис. 3. Мікроструктура сталі 25XНЗМФА після моделювання різних термічних циклів: а – вихідний стан; б – $w_{6/5} = 0,3$ °С/с; в – 1,6; г – 2,7; д – 20; е – 100 (×300)

ня може проходити в бейнітній та мартенситній областях. Феритне та перлітне перетворення не спостерігалось.

При швидкості охолодження 0,3 °C/c відбувається переважно однофазне бейнітне перетворення з формуванням зернистого бейніту (рис. 3, б). При збільшенні швидкості охолодження від 0,3 до ~ 2,7 °C/c перетворення проходить як у бейнітній, так і мартенситній областях і супроводжується зростанням твердості від 419 до 556 HV. Характерна для цього інтервалу структура, одержана при $w_{6/5} = 1,6$ °C, показана на рис. 3, в: структурні складові – пластинчастий бейніт та мартенсит. При $w_{6/5} \geq 2,7$ °C/c видбувається тільки мартенситне перетворення з утворенням голчастого мартенситу (рис. 3, з-і); рівень твердості залишається високим у всьому інтервалі застосованих швидкостей охолодження ($w_{6/5} = 2,7...100$ °C/c) і становить приблизно 520...580 HV.

Приблизна оцінка схильності сталі до утворення холодних тріщин при зварюванні може бути зроблена за результатами дослідження температури закінчення мартенситного перетворення за різних швидкостей охолодження за рівнем твердості, а також за величиною вуглецевого еквіваленту C_E , який визначається з урахуванням хімічного складу. Наприклад, у даному випадку можна скористатись виразом МІЗ (ІВ) [11], розробленим для низьколегованих сталей з межами легування, до яких близько підходить досліджувана сталь:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}, \%$$

Вважається, що при C_E більше 0,40 % існує ризик появи холодних тріщин. Для сталі 25ХНЗМФА з фактичним складом, приведеним у табл. 1, розрахунок дає $C_E = 0,97$ %, що свідчить про можливість утворення тріщин в зварних з'єднаннях. Однак цей показник має недолік, оскільки не враховує поведінку сталі при зварюванні [11]. Також прийнято вважати, що сталь має схильність до утворення холодних тріщин, коли мартенситне пе-

ретворення закінчується при температурах нижче 300 °C, а твердість продуктів перетворення перевищує 350...360 HV [12–14].

Аналіз термокінетичної діаграми перетворення аустеніту сталі 25ХНЗМФА показує, що при швидкостях охолодження $w_{6/5} = 1,6...100$ °C/c температура закінчення мартенситного перетворення перебуває у межах 170...180 °C. Лише при $w_{6/5} = 0,3$ °C/c, при якій ще спостерігалось часткове утворення мартенситу, температура кінця мартенситного перетворення підвищувалась до 320 °C, а твердість продуктів перетворення знижується до 300 HV.

При реальному зварюванні швидкість охолодження металу зварного з'єднання може бути дещо вищою за мінімальну, одержану у дилатометричних експериментах. Орієнтовна швидкість охолодження може бути оцінена за допомогою аналітичних рівнянь з теорії теплових процесів зварювання; для розрахунку миттєвої швидкості охолодження застосовано рівняння типу [15]:

$$w = 2\pi\lambda[(T-T_0)^2/(q/v)],$$

де w – швидкість охолодження при наплавленні валика на поверхню масивного тіла (схема розрахунку обрана з урахуванням можливого розсіяння тепла при зварюванні товстостінного виробу); λ – коефіцієнт теплопровідності; T і T_0 – температура, для якої розраховується w , і початкова температура сталі; v – швидкість зварювання; $q = \eta \cdot I \cdot U$ – теплова потужність зварювальної дуги, яка визначається добутком ефективного ККД нагріву деталі дугою (η), зварювального струму (I) і напруги (U).

Для розрахунків обрано значення $\eta = 0,9$ (для зварювання під флюсом) і $\lambda \approx 30$ Вт/(м·°C) (за даними для близької за легуванням сталі 30ХН2МФА). Для температури $T = 550$ °C – як середньої в інтервалі 600...500 °C, і початкової температури підігріву $T_0 = 200, 300, 350$ °C одержано наступні значення середньої швидкості охолодження $w_{6/5}$:

- 10,5 °C/c при підігріві до 200 °C;
- 5,4 °C/c при підігріві до 300 °C;

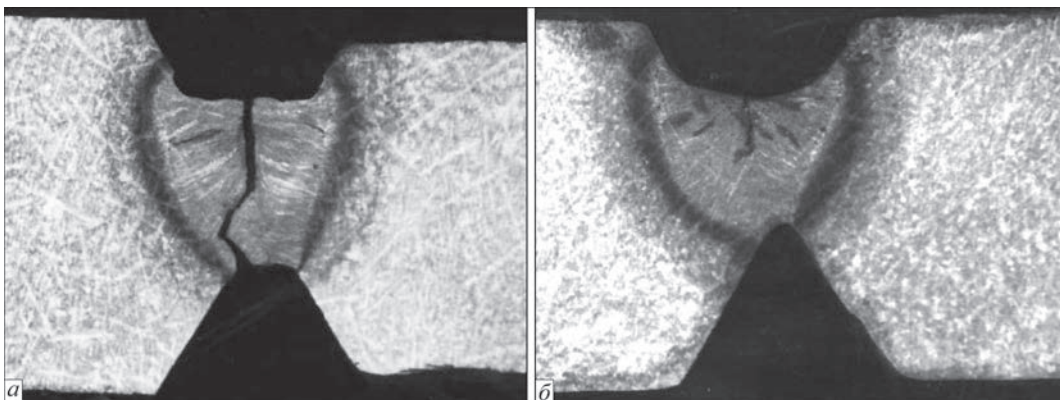


Рис. 4. Кристалізаційні тріщини в швах при зварюванні проб зі сталі 25ХНЗМФА дротом Св-08ХН2ГМЮ (а – діаметром 3 мм; б – 2)

– 3,4 °C/с при підігріві до 350 °C.

При зварюванні без підігріву – $w_{6,5} = 24,07$ °C/с.

Тобто в умовах дугового зварювання під флюсом у зварних з'єднаннях буде проходити мартенситне перетворення в інтервалі від $M_s \approx 380$ °C до $M_f \approx 170 \dots 180$ °C із результируючою твердістю сталі, що значно перевищує орієнтовний критичний рівень у 350 HV.

Таким чином, попередня оцінка зварюваності сталі 25ХНЗМФА за величиною розрахункового вуглецевого еквіваленту і за аналізом закономірностей перетворення аустеніту свідчить про високу схильність її зварних з'єднань до утворення холодних тріщин. Для запобігання тріщиноутворенню при всіх видах механізованого зварювання необхідний попередній і супутній підігрів.

Зазвичай зварювання складнолегованих енергомашинобудівних сталей передбачено проводити з підігрівом до 350 °C і вище. Проте як сам підігрів, так і висока температура цієї операції ускладнює технологічний процес. Крім того, завищення температури підігріву може призводити до збільшення залишкових напружень і спричиняти погіршення мікроструктури. З фізико-металургійної точки зору при зварюванні сталей з мартенситним перетворенням доцільно робити попередній підігрів і підтримувати міжпрохідну температуру в межах інтервалу $M_s - M_f$, роблячи перевагу температурам, близьким до M_f . Такий підхід робить можливим проходження мартенситного перетворення в зоні останнього виконаного проходу, а повторний зварювальний нагрів, активуючи дифузійні процеси, спричиняє частковий розпад мартенситу – відпуск загартованих шарів, а також зменшення в них концентрації дифузійного водню; результатом є підвищення опору уповільненому руйнуванню [16]. Обмеження рівня підігріву також спрощує і сам виробничий процес.

Уточнення температури попереднього підігріву доцільно проводити шляхом зварювання технологічних проб. Попередні випробування, а також практичний досвід показали, що у зварних з'єд-

наннях сталі 25ХНЗМФА головним чином спостерігались тріщини в зоні металу швів. З цього приводу в роботі застосовано проби типу «L» Ліхайдського університету, конфігурація яких сприяє ініціюванню тріщин саме у швах.

Експериментально встановлено, що в усіх випадках зварювання зразків без попереднього підігріву і з попереднім підігрівом до 150, 200, 250 і 300 °C мало місце утворення тріщин в зоні швів. Тріщини виявляли у гарячому металі одразу після видалення шлакової кірки.

Виходячи з практичного досвіду відомо, що зазвичай підігрів рівня 250...300 °C є достатнім для усунення холодних тріщин у з'єднаннях гартівних енергомашинобудівних сталей. Крім того, їх утворення проходить після завершення зварювання та охолодження металу, і в окремих випадках – через декілька десятків годин. У даному випадку тріщини утворювались у металі шва при зварюванні і за умови підігріву, який унеможливило саме появу холодних тріщин. Тобто можна вважати, що тріщини у швах, утворені при зварюванні з підігрівом, не відносяться до холодних.

Після проведення повного циклу дослідження встановлено, що тріщини на пробах зі сталі 25ХНЗМФА є гарячими, що утворюються у процесі кристалізації металу шва.

Утворення таких тріщин у швах відбувалось за різних експериментальних умов. Зміна діаметру дроту із 2 на 3 мм з метою впливу на форму ванни і орієнтацію елементів кристалізації не призвела до позитивних наслідків (рис. 4). Враховуючи складне легування застосованого дроту, проведено зварювання низьковуглецевим дротом Св-08ГА. Такий захід також не дозволив уникнути появи кристалізаційних тріщин. Тріщини також утворювались при наплавленні валиків на поверхню сталі 25ХНЗМФА як за зворотної, так і прямої полярності (рис. 5).

Аналіз хімічного складу металу шва, звареного дротом Св-08ХН2ГМЮ, показав підвищений вміст вуглецю (0,17...0,18 %) біля тріщини. За усе-

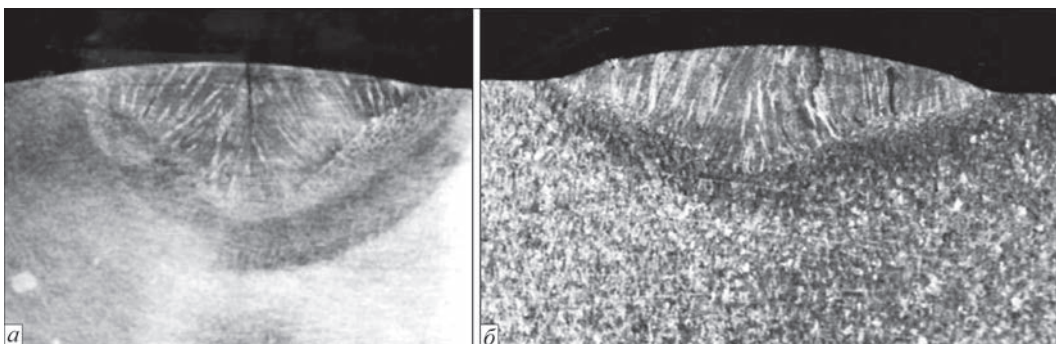


Рис. 5. Кристалізаційні тріщини при наплавленні на поверхню сталі 25ХНЗМФА валика дротом Св-08ГА діаметром 3 мм (а – зворотна полярність; б – пряма полярність)

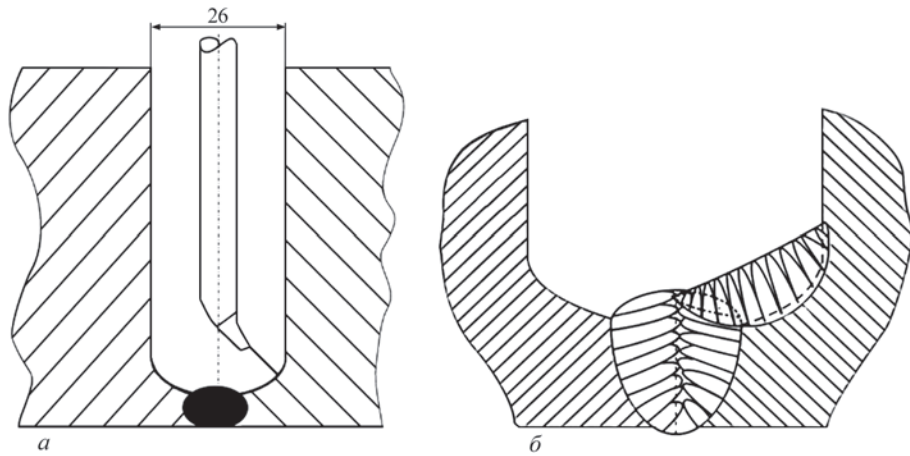


Рис. 6. Схеми розташування мундштука у вузькій розробці (а) і характеру кристалізації валиків (б)

редним складом сірка і фосфор знаходились у допустимих межах (S – 0,025 %, P – 0,020 %). Однак металографічні дослідження з використанням локального мікрерентгенспектрального аналізу виявили сегрегацію сірки і фосфору в районі зародження і поширення тріщини, що можна вважати одним із чинників можливого сприяння утворенню таких дефектів.

Також підвищена схильність зварних з'єднань сталі 25ХНЗМФА до утворення гарячих тріщин може бути зв'язана з високим вмістом вуглецю і нікелю в основному металі [13], що, наприклад, відображає показник схильності до гарячих тріщин HCS (Hot Cracking Susceptibility) [12]:

$$HCS = \frac{C \cdot \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3 Mn + Cr + Mo + V}$$

Гарячі тріщини в зварному з'єднанні не утворюються, якщо HCS < 4,0; у разі високоміцних сталей великої товщини гарячі тріщини не будуть утворюватися при HCS < 1,6...2,0. У нашому випадку, для сталі 25ХНЗМФА HCS = 6,7, що свідчить про високу схильність металу швів з таким хімічним складом до формування кристалізаційних тріщин.

При зварюванні сталі 25ХНЗМФА під флюсом у вузьке розкриття крайок гарячі тріщини утворювались у першому кореновому шарі, коли дуга була розташована під прямим кутом до поверхні металу, що зварюється. При такому процесі частка основного металу при перемішуванні з наплавленим металом становила ~50 %. При подальшому заповненні зазору з орієнтацією дуги під гострим кутом до крайок глибина проплавлення зменшувалась (рис. 6), частка основного металу також зменшувалась, але не перевищувала максимально-

го рівня 30 %. За цих умов, крім кореневого шару, тріщини у шві не утворювались.

Для порівняння проведено оцінку хімічного складу металу кореневого і заповнювальних проходів. Вміст у шві кожного з елементів E_{WMi} розраховували як сумарну кількість цього елемента, що перейшла з основного металу і присадного дроту, за виразом:

$$E_{WMi} = \Sigma(D_{PM} \cdot E_{PMi} + D_{WR} \cdot E_{WRi}),$$

де D_{PM} , D_{WR} – частки основного металу (PM) і зварювального дроту (WR) при змішуванні у шві (для кореневого проходу D_{PM} і D_{WR} прийнято рівними 50 і 50 %, для заповнювальних проходів – 30 і 70 %); E_{PMi} , E_{WRi} – концентрації i-го елемента у основному металі та у зварювальному дроті.

Орієнтовний склад різних ділянок металу шва та відповідні значення показника HCS наведено у табл. 2. Для кореневого проходу округлене значення HCS становить ~3,8 (фактично – 3,778), перевищуючи відповідне значення для заповнювальних проходів, який у розрахунках дорівнював 3. Однак слід зазначити, що для заповнювальних проходів слід вважати HCS ≤ 3 %, оскільки для цих умов, як зазначено вище, $D_{PM} \leq 30$ %.

Як видно із результатів розрахунків, в обох випадках показники HCS були менше критичного рівня HCS = 4, однак тріщини все ж таки виникали у кореновому проході. Крім того, цей показник для заповнювальних проходів був більшим за критичний для товстостінного з'єднання підвищеної жорсткості (HCS = 2), хоча тріщини у металі заповнювальних проходів не утворювались. Таким чином, одержані дані досліджень свідчать, що не існує однозначного пояснення причини появи кристалізаційних тріщин, що, наприклад, видно з неузгодженості результатів зварювання та оцінкою технологічної міцності за критерієм HCS. Загалом

Таблиця 2. Результати розрахунку хімічного складу кореневого та заповнювального проходів і показників HCS

Зони шва	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	HCS
Корінь	0,180	0,285	0,655	1,20	2,75	0,465	0,075	0,020	0,022	3,8
Заповнювальний прохід	0,152	0,295	0,773	1,04	2,45	0,519	0,045	0,020	0,021	3,022

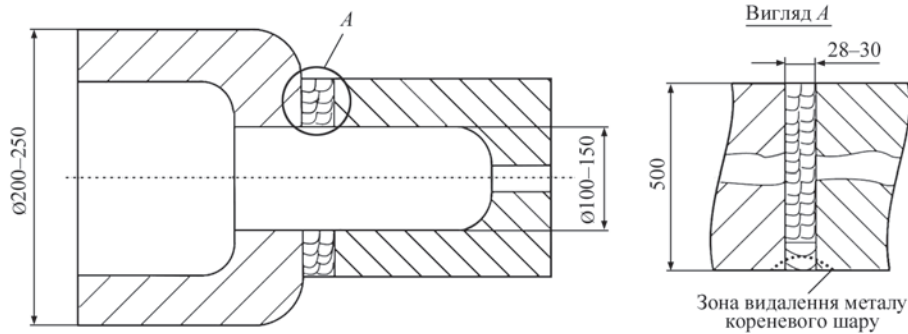


Рис. 7. Схема зварного циліндру гідропресу

утворення кристалізаційних тріщин має складний (комплексний) механізм, у якому одночасно реалізуються як особливості металургійного, так і силового чинників [13, 15]. У залежності від хімічного складу, переважний вплив можуть завдавати сегрегації найбільш шкідливих домішок – S і P, або C та Ni; в очищених від домішок низьколегованих швах в утворенні тріщин домінують процеси сегрегації останніх двох елементів [13, 17]. За даними [17] у залізвуглецевих швів низька технологічна міцність спостерігалась приблизно за 0,1 % C і за $C > 0,17$ %. У швів типу Fe–Ni зростання схильності до тріщин мало місце за $Ni > 2...3$ %. Роль C і Ni у механізмі утворення тріщин пов’язується також з їх впливом на характер первинної кристалізації [17]. Вивчення сумісного впливу C і Ni з використанням концентраційного показника Ni_{eq} ($Ni_{eq} = Ni + kC$, де k – коефіцієнт, що залежить від вмісту C), показало, що суттєве зростання схильності до кристалізаційних тріщин відбувалось при Ni_{eq} більше $\sim 3,4$ %. За цієї умови первинна кристалізація з утворенням δ -фази (за схемою $L \rightarrow \delta$) переходила до кристалізації $\delta + \gamma$ через перитектичну реакцію $(L \rightarrow \delta + (L + \delta = \gamma) \rightarrow \delta + \gamma)$. Зниження опору утворенню тріщин може бути наслідком: а) підсилення ліквідації S та P при зменшенні їх розчинності у γ -фазі, в якій також більше розчинялись Ni і C; б) додаткового (до загального теплового скорочення) збільшення рівня мікрореформацій поблизу границі твердіння в результаті об’ємних змін, обумовлених утворенням γ -фази при двофазній кристалізації $\delta + \gamma$.

У розглянутому випадку зварювання сталі 25ХНЗМФА метал швів, у залежності від ступеня змішування основного і зварювального металів, може мати результуючий вміст C та Ni, за яких збільшується його схильність до кристалізаційних тріщин. Так, при виконанні корневих проходів за рахунок значної частки основного металу (до 50 %) шов збагачується вуглецем (до 0,18 %). Такий рівень вуглецю у металі шва сприяє утворенню гарячих тріщин. Сегрегація шкідливих домішок (S, P), за їх звичайного допустимого вмісту в сталі, є та-

кож важливим металургійним чинником зниження технологічної міцності. Додатковий ефект створює нікель, підсилюючи ліквідацію цих елементів і сприяючи формуванню осередків зародження тріщин. Негативний вплив значного розбавлення наплавленого металу основним показано також на прикладі наплавлення валиків на сталь дротом Св-08ГА, коли частка основного металу складала 60...80 %. У свою чергу, зменшення показника НСS для заповнювальних проходів відносно корневих може сприяти підвищенню опору утворенню тріщин. Крім того, одним з важливих чинників утворення та запобігання гарячих тріщин є також форма перерізу шва і відповідні напрями росту кристалітів при кристалізації зварювальної ванни [13, 15]. Кореневий прохід характеризується глибоким проплавленням відносно ширини ванни і транскристалітним (зустрічним) напрямом росту елементів кристалізації від стінок ванни. Формування збагаченої домішками рідини в осьовій зоні при стиковці кристалітів при такій формі ванни сприяє появі тріщин під впливом зварювальних деформацій (рис. 6).

При більш широкій і неглибокій формі ванни з направленим до zenіту ростом кристалітів і витіснен-

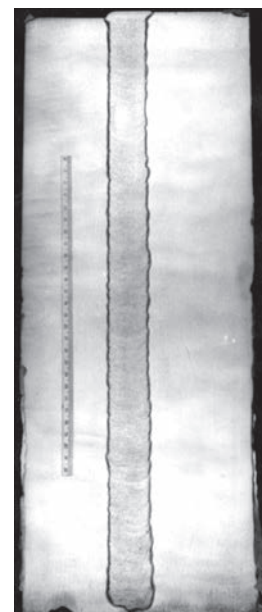


Рис. 8. Макрошліф поперечного перерізу стика глибиною шва 500 мм

Таблиця 3. Механічні властивості зварного з'єднання сталі 25ХНЗМФА, звареного дротом Св-08ХН2ГМЮ під флюсом АН-17 у стані після високого відпуску

Метал шва					Зварне з'єднання	
σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²	σ_b , МПа*	KCU , Дж/см ² **
Вимоги до властивостей зварних з'єднань						
≥ 600	≥ 500	≥ 12	≥ 40	≥ 50	≥ 600	≥ 50
Результати випробувань						
786	583	16,6	55,6	115	633	72,0
783	575	16,3	51,0	137	735	62,0
788	583	16,6	55,6	122	705	115,0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
785	580	16,5	54,0	124	691	83,0

Примітка. * – руйнування по ЗТВ; ** – надріз по лінії сплавлення.

ням у верхню частину легкоплавкої рідини збільшується опір утворенню гарячих тріщин. Така кристалізація характерна для заповнювальних проходів. Відпрацювання технології на макетах промислових виробів підтвердило існування проблеми утворення гарячих тріщин тільки для корневих проходів.

Для промислового виготовлення корпусу гідроциліндра зі сталі 25ХНЗМФА погоджено застосування зварювання під флюсом у вузьке розкриття крайок, яке характеризується високою продуктивністю і загальною високою якістю товстостінних з'єднань (рис. 7, 8). Однак, враховуючи проблемність з якістю саме корневих проходів, після повного заповнення розробки обов'язковим було видалення верстатним механічним методом корневого шару металу шва (рис. 7).

Для відпуску гартівних структур у зоні з'єднання, максимального зняття залишкових напружень і поліпшення пластичності та в'язкості металу, зварний виріб підлягає обов'язковому високому відпуску. Враховуючи існуючі рекомендації і проведені випробування, обрано режим відпуску за температури 570 °С тривалістю 30 год, який забезпечує необхідні механічні властивості зварних з'єднань (табл. 3). На стадії виготовлення і після проведення термічної обробки рекомендовано ретельно застосувати усі методи неруйнівного контролю якості.

Розроблений технологічний процес зварювання і термічної обробки корпусів потужних гідроциліндрів впроваджений у виробництві устаткування, призначеного для виготовлення методом пресової штамповки пошкоджених елементів цивільних конструкцій і деталей озброєння та спорядження для ЗСУ, зокрема вузлів далекобійних гармат, крилатих і балістичних ракет, що є актуальним для ВПК України.

Висновки

1. Показано, що в умовах автоматичного зварювання під флюсом сталі 25ХНЗМФА із застосуванням сполучення флюсу АН-17 і дроту Св-08ХН2ГМЮ метал в зоні з'єднання проходить загартування з утворенням переважно мар-

тенситної структури з твердістю до 520...580 НВ, що обумовлює ризик утворення холодних тріщин. Виключення появи холодних тріщин досягається попереднім/супутнім підігрівом до 250...300 °С.

2. При лабораторних випробуваннях і зварюванні під флюсом у вузький зазор промислових макетів встановлено, що для виготовлення товстостінних виробів зі сталі 25ХНЗМФА основну проблему складає утворення кристалізаційних тріщин при виконанні корневих проходів; при подальшому заповненні розробки гарячі тріщини не спостерігались.

3. З урахуванням результатів експериментів і сучасних теоретичних положень зроблено припущення, що у розглянутому випадку виникнення кристалізаційних тріщин має комплексну природу. До головних чинників можна віднести збагачення металу шва С і Ni внаслідок збільшення частки основного металу у розплаві ванни до 50 %, що характерно для корневих проходів, відповідне підсилення процесів сегрегації С, S, Р з утворенням легкоплавких осередків руйнування, а також несприятливу форму ванни з транскристалітним типом росту елементів кристалізації. Заповнювальні проходи формуються при зменшенні частки основного металу у шві до 30 % і нижче, а також з формою ванни, сприятливою для витіснення до її поверхні легкоплавких складових елементів при кристалізації, що у комплексі обумовлює відсутність гарячих тріщин.

4. Для промислового виготовлення відповідальних виробів зі сталі 25ХНЗМФА з товщиною стінки до 500 мм впроваджено технологію автоматичного зварювання під флюсом у вузький зазор, яка передбачає після зварювання з'єднання видалення верстатним методом шару металу з корневим проходом. Кінцевою операцією є високий відпуск за температури 570 °С.

Список літератури

1. Башнин Ю.А., Цурков В.Н., Коровин В.Н. (1985) *Термическая обработка крупногабаритных изделий и полуфабрикатов на металлургических заводах*. Москва, Металлургия.
2. Патона Б.Е. (1974) *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Москва, Машиностроение.
3. Макара А.М., Ковалев Ю.Я., Новиков И.В. (1972) Надрывы в околошовной зоне при электрошлаковой

- сварке конструкционных сталей. *Автоматическая сварка*, **5**, 1–5.
- Eregin L.P., Malaj A.E. (1978) Условия образования околошовных трещин – надрывов при электрошлаковой сварке хромоникельмолибденовых сталей. *Сварочное производство*, **10**, 26–27.
 - Макара А.М. (1963) *Исследование вопросов технологии и металловедения сварки легированных конструкционных сталей. Сборник доклад – обобщение опубликованных работ.* Киев, Издательство АН УССР.
 - Касаткин Б.С., Царюк А.К., Левенберг Н.Е., Пилипенко Н.В. (1984) Технологические возможности сварки под флюсом в узкий зазор среднелегированных сталей большой толщины. *Автоматическая сварка*, **7**, 41–44.
 - Tsaruk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I. (2016) Mechanized narrow-gap submerged arc welding of thick walled cylindrical products. In: *Medovar Memorial – Symposium 7–10 June*. Kyiv, Ukraine, 82–90.
 - Касаткин Б.С., Кравченко Н.Ф., Иваненко В.Д. и др. (1989) Сварка под флюсом в узкую разделку толстостенных цилиндрических изделий. *Автоматическая сварка*, **5**, 31–35.
 - Лебедев Ю.М., Кравченко Л.П., Данилюк Н.Н. (1978) Методика моделирования сварочных термомодеформационных циклов. *Автоматическая сварка*, **12**, 31–33.
 - Kihara, H., Suzuki, H., Makamura, H. (1962) Weld cracking test of high strength Steel and electrodes. *Weld J.*, **41**, 36–38.
 - (1992) *Steel. A Handbook for Materials Research and Engineering. V.1: Fundamentals*. Springer-Verlag Heidelberg and Verlag Stahleisen m.b.H., Dusseldorf.
 - Гривняк И. (1984) *Свариваемость сталей*. Москва, Машиностроение.
 - John, S. Lippold (2015) *Welding Metallurgy and Weldability*. Wiley&Sons.
 - (2017) *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*. Ed. by Augusto Di Gianfrancesco. Elsevier Ltd.
 - Sindo, Kou (2003) *Welding Metallurgy*. Second Edition. Wiley&Sons.
 - Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Nimko, M.A. et al. (2019). Effect of reheating in multipass submerged-arc welding on delayed fracture resistance of rotor steel welded joints. *The Paton Welding J.*, **3**, 11–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.03.02>
 - Shankar, V., Devletian, J.S. (2005) Solidification cracking in low alloy steel welds. *Science And Technology of welding and Joining*, **10**, 2, 236–243.
 - Paton, B.E. (1974) *Technology of electric fusion welding of metals and alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 - Makara, A.M., Kovalev, Yu.Ya., Novikov, I.V. (1972) Tears in near-weld zone during electroslag welding of structural steels. *Avtomaticheskaya Svarka*, **5**, 1–5 [in Russian].
 - Eregin, L.P., Malaj, A.E. (1978) Conditions of formation of near-weld cracks-tears in electroslag welding of chrome-nickel-molybdenum steels. *Svarochnoe Proizvodstvo*, **10**, 26–27 [in Russian].
 - Makara, A.M. (1963) *Investigation of problems of technology and metals science of welding of alloyed structural steels: Collection*. Kyiv, Izd-vo AN Ukr. SSR [in Russian].
 - Kasatkin, B.S., Tsaryuk, A.K., Levenberg, N.E., Pilipenko, N.V. (1984) Technological possibilities of narrow-gap submerged arc welding of medium-alloy thick steels. *Avtomaticheskaya Svarka*, **7**, 41–44 [in Russian].
 - Tsaruk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I. (2016) Mechanized narrow-gap submerged arc welding of thick walled cylindrical products. In: *Medovar Memorial – Symposium 7–10 June*. Kyiv, Ukraine, 82–90.
 - Kasatkin, B.S., Kravchenko, N.F., Ivanenko, V.D. et al. (1989) Narrow-gap submerged arc welding of thick-walled cylindrical products. *Avtomaticheskaya Svarka*, **5**, 31–35 [in Russian].
 - Lebedev, Yu.M., Kravchenko, L.P., Danilyuk, N.N. (1978) Procedure of modeling of welding thermodeformational cycles. *Avtomaticheskaya Svarka*, **12**, 31–33 [in Russian].
 - Kihara, H., Suzuki, H., Makamura, H. (1962) Weld cracking test of high strength steel and electrodes. *Welding J.*, **41**, 36–38.
 - (1992) *Steel. A Handbook for Materials Research and Engineering. V.1: Fundamentals*. Springer-Verlag Heidelberg and Verlag Stahleisen m.b.H., Dusseldorf.
 - Hrivnak, I. (1984) *Weldability of steels*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 - John, S. Lippold (2015) *Welding Metallurgy and Weldability*. Wiley&Sons.
 - (2017) *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*. Ed. by Augusto Di Gianfrancesco. Elsevier Ltd.
 - Sindo, Kou (2003) *Welding Metallurgy*. Second Ed. Wiley&Sons.
 - Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Nimko, M.A. et al. (2019) Effect of reheating in multipass submerged-arc welding on delayed fracture resistance of rotor steel welded joints. *The Paton Welding J.*, **3**, 11–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.03.02>
 - Shankar, V., Devletian, J.S. (2005) Solidification cracking in low alloy steel welds. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **10**(2), 236–243.

References

TECHNOLOGICAL STRENGTH OF 25KhN3MFA STEEL JOINTS IN SUBMERGED-ARC WELDING

A.K. Tsaryuk, V.Yu. Skulskyi, V.P. Yelagin, I.G. Osipenko

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

E-mail: tsaryuk@paton.kiev.ua

Weldability of 25KhH3MFA steel was studied and requirements were established for the possibility of its application in fabrication of welded structures in heavy mechanical engineering. Investigations of weldability of 25KhH3MFA steel showed that hot and cold cracks form in welding of this steel. To prevent cold cracking in the welded joints, welding should be performed with preheating and accompanying heating up to 250...300 °C and mandatory post-weld tempering at 570 ~C. Hot cracks form in welding the root layer of the weld metal, which is related to a significant fraction of the base metal (> 50 %) at mixing with the deposited metal. To be able to manufacture welded structures from this steel, it is necessary to use only automatic narrow-gap submerged-arc welding and to remove the root layer from the welded joint internal side. When it is impossible to remove the root weld, welded structures from 25KhH3MFA steel are not allowed for operation. 17 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

Keywords: complex-alloyed steels, narrow-gap submerged-arc welding, weldability, cold cracks, preheating and accompanying heating, structure

Отримано 04.12.2024

Отримано у переглянутому вигляді 16.01.2025

Прийнято 07.04.2025

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ДЛЯ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов

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

Проведено аналіз існуючих методик оцінки зварювально-технологічних властивостей електродних матеріалів, які застосовуються під час електродугового наплавлення (зварювання). Розглянуто основні принципи оцінювання стабільності дугового процесу. Визначено основні підходи до дослідження властивостей електродних матеріалів і перелік контрольованих параметрів, які найчастіше використовуються для цього. Показано, що кількісні критерії оцінки мають переваги над якісними. На основі проведеного аналізу розроблено комплексну методику оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів, яка складається з трьох основних блоків. Перший блок використовує візуальну експертну оцінку процесу дугового наплавлення та якості формування наплавленого металу, яка виконується з використанням диференціальної бальної системи. Другий блок спрямований на оцінку характеристик плавлення порошкових електродних дротів на основі експериментально визначених коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат. Третій блок охоплює оцінку стабільності дугового процесу, яка виконується за експериментально визначеними коефіцієнтами варіації величин струму та напруги на дузі. Переваги використання запропонованої комплексної методики продемонстровано на прикладі оцінки властивостей реальних порошкових дротів для дугового наплавлення. Установлено, що ця методика є інформативнішою порівняно з підходами, які базуються лише на визначенні якісних показників. Підтверджено, що тип і гранулометричний склад металевих компонентів осердя порошкових дротів впливають на стабільність дугового процесу наплавлення. Використання в осерді порошкових дротів більш хімічно чистих та однорідних за властивостями металевих гранульованих порошоків, у порівнянні з порошками феросплавів, дозволяє підвищити стабільність та продуктивність наплавлення на 15...30 %. Бібліогр. 19, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: дугове наплавлення, порошковий дріт, наплавлений метал, зварювально-технологічні властивості, стабільність наплавлення, коефіцієнти варіації

Вступ. Відомо, що порошковий дріт є високопродуктивним матеріалом, здатним вирішувати широкий спектр завдань, зокрема пов'язаних із виготовленням або відновленням методами дугового наплавлення деталей, які використовуються у різних галузях промисловості [1–3].

Порошковий дріт складається з металеві оболонки (з м'якої сталеві, нікелевої, титанові стрічки тощо) та осердя, заповненого порошковими компонентами. До складу осердя входять легувальні компоненти (феросплави, чисті метали, карбіди, бориди тощо), які забезпечують необхідний хімічний склад і властивості наплавленого металу [1–3]. Окрім легувальних елементів, до складу осердя часто додають розкислювальні, газо- та шлакоутворювальні компоненти, що сприяють захисту та рафінуванню розплавленого металу. Додатково до осердя можуть вводитися легкоіонізуючі добавки, які стабілізують дуговий розряд, що підвищує ефективність процесу наплавлення (зварювання) [1–5].

Перевагами порошкових дротів є їхня універсальність, широкі можливості легування наплавленого металу, а також висока продуктивність, яка

забезпечує суттєве зниження матеріальних витрат [1, 5, 6]. Завдяки цьому порошкові дрти успішно застосовуються в процесах механізованого та автоматичного наплавлення (зварювання). За своїми операційними показниками вони практично не поступаються дротам суцільного перерізу, тому для наплавлення можна використовувати серійне обладнання [6].

Проте, порівняно з наплавленням порошковими дротами, використання суцільних електродних дротів дозволяє отримати метал з одноріднішим хімічним складом і властивостями. Це обумовлено вищою стабільністю процесу наплавлення в другому випадку.

Висока стабільність процесу наплавлення, а отже, і більша однорідність наплавленого металу за його складом і властивостями особливо важлива при наплавленні корозійно-, газоерозійно- та зносоустійких шарів відповідальних деталей, які експлуатуються в хімічній, нафтогазовій, металургійній та інших галузях промисловості. У таких випадках при виборі електродних матеріалів виникає необхідність оцінки їхніх зварювально-технологічних властивостей, а також вивчення впливу численних

Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>, Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>

© А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов, 2025

факторів, серед яких ключове значення має склад наповнювача (осердя) порошкових дротів.

Метою роботи є аналіз існуючих методик оцінки зварювально-технологічних властивостей електродних матеріалів, які застосовуються при наплавленні (зварюванні), а також розробка відповідної методики для дугових методів наплавлення із використанням порошкових електродних дротів.

Аналіз джерел посилань. Стабільність процесу наплавлення (зварювання) є одним із ключових параметрів зварювально-технологічних властивостей електродних матеріалів. Водночас це – складне та багатофакторне поняття, яке не має єдиної стандартизованої методики оцінювання [4, 7]. Стабільність залежить від параметрів об'єкта дослідження, методику її визначення дослідники обирають або розробляють у кожному конкретному випадку, залежно від поставлених задач.

Для підвищення рівномірності плавлення осердя та оболонки порошкового дроту, з метою підвищення однорідності отриманого наплавленого металу, застосовують різні технологічні прийоми. Серед них: збільшення частки металевих порошоків у складі осердя, вибір легкоплавких композицій для шлакоутворювальних компонентів, зменшення товщини оболонки тощо [3].

Часто зварювально-технологічні властивості електродних матеріалів оцінюють шляхом візуального огляду отриманих зразків та аналізу якості формування наплавленого валика чи зварного шва [8–11]. Візуальний огляд здійснюють за допомогою лупи зі збільшенням $\times 2 \dots 5$, фіксуючи при цьому контрольовані параметри. До них належать: відповідність геометричних розмірів наплавленого валика (або зварного шва) технічній документації; сталість розмірів за всією довжиною контрольованого відрізка; відсутність подрізів і видимих дефектів тощо. Проте така методика дозволяє лише опосередковано оцінити стабільність дугового процесу.

На думку авторів [3, 4, 6], стабільність дугових процесів може бути ефективно оцінена за допомогою кількісних показників. Процес вважається стабільним, якщо відхилення його параметрів від середніх значень не перевищує заданого рівня. Мірою стабільності при цьому є величина відхилення параметра від його середнього значення. У якості такої міри можуть бути використані дисперсія, середньоквадратичне відхилення або коефіцієнт варіації [12].

Так, у [6] для визначення та оптимізації зварювально-технологічних характеристик покритих електродів і зварювального дроту були обрані наступні критерії стабільності процесу: середня та

критична частота коротких замикань, коефіцієнти варіації відповідної частоти, а також середня та максимальна маса краплі металу.

У [5, 13], присвячених зварюванню самозахисними порошковими дротами, оцінку стабільності процесу виконували, аналізуючи величину коефіцієнтів варіації зварювального струму та напруги, а також середній час та частоту коротких замикань, визначених за допомогою системи, яка використовує швидкісний аналого-цифровий перетворювач. Додатково оцінювали віддільність шлакової кірки, наявність дефектів і втрати металу на розбризкування.

Зварювально-технологічні властивості електродів у [14] оцінювали за допомогою комплексної системи бального ранжування, враховуючи такі контрольовані параметри: легкість збудження дуги, якість формування шва, ступінь розбризкування металу, покривну властивість і легкість відокремлювання шлаку, наявність дефектів. Стабільність горіння дуги оцінювали з використанням автоматизованого комплексу діагностики та контролю параметрів зварювальних процесів, також переводячи отримані дані в підсумкові бали.

У [15, 16] при наплавленні порошковими дротами та стрічками використовували методику оцінки зварювально-технологічних властивостей на основі визначення якості формування наплавленого металу, коефіцієнтів розплавлення, наплавлення, втрат на розбризкування та стабільності горіння дуги. Якість формування оцінювалася співвідношенням ширини (b) наплавленого валика до його висоти (h). На думку авторів зазначених робіт, чим більше величина (b/h), тим вище якість формування. Стабільність визначалася величиною коефіцієнтів варіації за напругою та струмом: чим вони менші, тим процес горіння дуги стабільніший.

У [17] зварювально-технологічні властивості порошкового дроту, мікролегованого бором, оцінювали за комплексною методикою, яка містила такі якісні параметри: характер збудження дуги (легкий, середній, ускладнений); стабільність горіння дуги (стабільне, задовільне, нестабільне); якість формування наплавленого валика (якісне, задовільне, неякісне); тип і наявність дефектів у наплавленому металі (відсутні, поодинокі, значна кількість); якість відділення шлакової кірки (легке, задовільне, ускладнене); відповідність хімічного складу та твердості наплавленого металу технічним вимогам (відповідає, не відповідає). Також оцінювали характеристики плавлення за кількісними показниками: коефіцієнтами розплавлення, наплавлення та втрат.

Розробка методики оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для дугового наплавлення. Підсумовуючи наведені дані, можна стверджувати, що для підвищення інформативності та обґрунтованості вибору електродних матеріалів для наплавлення оцінка їх зварювально-технологічних властивостей повинна бути комплексною. При цьому слід враховувати такі ключові показники, як: характеристики плавлення електродного дроту, наявність дефектів, якість формування наплавленого металу та якість відділення шлакової кірки (якщо застосовуються спосіб наплавлення під флюсом або самозахисними порошковими дротами).

Якість формування наплавленого металу, на нашу думку, доцільно оцінювати за допомогою диференціальної бальної системи. Застосування математичних виразів для такої оцінки, заснованої на співвідношенні його параметрів [15], не несе практичної користі, оскільки режими наплавлення зазвичай обирають з урахуванням вимог до забезпечення заданої глибини проплавлення, ширини чи висоти наплавленого валика [1].

Оцінку стабільності дугового процесу доцільно виконувати на основі кількісних показників. Це особливо важливо при використанні електродних матеріалів, близьких за характеристиками, коли візуальне визначення стабільності дугового процесу значно ускладнене. Найточнішої та найінформативнішої оцінки можна досягти шляхом аналізу

інтегральних величин, які визначають енергетичний стан дугового процесу. Прикладами таких величин є напруга та струм дуги, які багаторазово фіксуються впродовж процесу [4].

На основі проведеного аналізу та результатів власних експериментальних досліджень [17, 18] нами розроблено наступну методику комплексної оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для наплавлення, яка складається з трьох блоків.

Перший блок містить візуальну експертну оцінку процесу дугового наплавлення та отриманого наплавленого металу з використанням диференціальної бальної системи (табл. 1). Контрольовані параметри, які використовує даний блок: характер збудження дуги, якість формування наплавленого металу, наявність видимих дефектів, відповідність хімічного складу наплавленого металу вимогам та якість відокремлення шлакової кірки (за умови, що використовується спосіб наплавлення під флюсом або самозахисним порошковим дротом).

Другий блок містить оцінку характеристик плавлення (продуктивності) порошкових електродних дротів, яка визначається за коефіцієнтами розплавлення, наплавлення та втрат. Коефіцієнт розплавлення (α_p) характеризує питому (віднесену до одного ампера зварювального струму) продуктивність процесу розплавлення дроту. Коефіцієнтом наплавлення (α_n) характеризується питома продуктивність процесу наплавлення. Втра-

Таблиця 1. Контрольовані показники зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для наплавлення з бальною оцінкою за диференціальним методом

Контрольований параметр	Оцінка в балах	Коротка характеристика показника
Характер збудження дуги	0	Поганий. Запалювання не з першого дотику електроду до виробу або відсутність запалювання
	1	Задовільний. Запалювання без приварювання електроду
	2	Гарний. Запалювання відразу після дотику електроду до виробу
Якість формування наплавленого металу	0	Погана. Валик нерівномірний за шириною та висотою, поверхня крупнолуска
	1	Задовільна. Окремі нерівності за шириною чи висотою, у тому числі на краях, поверхня дрібнолуска
	2	Гарна. Валик рівномірний, з плавним переходом до основного металу, поверхня гладка
Наявність видимих дефектів (пори, тріщини, несплавлення)	0	Одна або більше тріщин завдовжки > 5 мм та/або ланцюжків, скупчень пор
	1	Тріщини відсутні. Поодинокі пори на відстані > 100 мм
	2	Дефекти відсутні
Відповідність хімічного складу наплавленого металу технічним вимогам	0	Не відповідає. Відхилення масової частки для будь-якого елемента більше ніж $\pm 10\%$ від його регламентованого значення або відхилення масової частки для двох чи більше елементів більше ніж $\pm 5\%$ від їх регламентованих значень
	1	Частково відповідає. Відхилення масової частки для будь-якого елемента більше ніж $\pm 5\%$ його регламентованого значення або відхилення масової частки для двох чи більше елементів більше ніж $\pm 2,5\%$ їх регламентованих значень
	2	Відповідає. Хімічний склад металу знаходиться в межах регламентованого діапазону за всіма елементами
Якість відокремлення шлакової кірки	0	Погана. При закінченні процесу наплавлення кірка не відокремлюється
	1	Задовільна. Відокремлюється при додатковому механічному впливі
	2	Гарна. Відокремлюється після наплавлення без додаткового механічного впливу

ти електродного металу (з урахуванням втрат на вигар і розбризкування) характеризуються відповідно коефіцієнтом втрат (ψ). Вказані коефіцієнти розраховуються за наступними виразами [17, 18]:

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I \cdot t}, \quad (1)$$

$$\alpha_n = \frac{G_n}{I \cdot t}, \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_p} \cdot 100\% \quad (3)$$

де G_p – маса розплавленого металу, г; G_n – маса наплавленого металу, г; I – зварювальний струм, А; t – час наплавлення, год.

Чим вище показники розплавлення та наплавлення і чим менше показник втрат, тим продуктивність наплавлення порошковим дротом вища.

Третій блок містить оцінку стабільності перебігу дугового процесу наплавлення, яку пропонується виконувати за дисперсією поточних значень величин струму та напруги на дузі при їх багаторазовій фіксації за розрахованими відповідними коефіцієнтами варіації. Застосування коефіцієнта варіації у якості контрольованого параметра дозволяє усунути вплив масштабу різних вибірок отриманих даних.

Для фіксації параметрів режиму протягом процесу наплавлення потрібно використовувати пристрій з високошвидкісними аналого-цифровими перетворювачами та функцією збереження отриманих даних. У нашій роботі для цієї мети використовувався цифровий записуючий мультиметр ANENG AN9002, оснащений високошвидкісним аналого-цифровим перетворювачем. Мультиметр у режимі реального часу зберігає результати вимірювань у власній пам'яті та дозволяє передавати їх на інші пристрої за допомогою технології зв'язку Bluetooth.

Аналіз отриманих поточних значень величин струму та напруги на дузі за допомогою розрахованих коефіцієнтів варіації можна виконувати за допомогою стандартних засобів, які входять до складу програм для математичного аналізу, таких, наприклад, як Microsoft Excel, MathLab тощо [19]. У даній роботі використовували вбудовані функції математичного аналізу програми Microsoft Excel.

Для визначення коефіцієнту варіації необхідно спочатку розрахувати стандартне відхилення (S). Для цього можна скористатись вбудованою функцією STDEV(число1; ...), де число1 – це перший числовий аргумент, який відповідає вибірці із генеральної сукупності. Замість аргументів, розділених крапкою з комою, можна використовувати масив чи посилання на масив. Функція STDEV

розраховує стандартне відхилення за наступною формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}, \quad (4)$$

де X – вибіркове середнє; n – розмір вибірки.

Далі потрібно визначити середнє арифметичне (\bar{X}), яке можна розрахувати за допомогою функції AVERAGE(число1; ...), де число1 – це перше число, посилання на комірку або діапазон, для якого потрібно обчислити середнє значення. При цьому слід враховувати, що функція AVERAGE обчислює середнє значення, тобто центр набору чисел у статистичному розподілі. Існує три найпоширеніші способи визначення середнього значення:

1. Середнє арифметичне – обчислюється шляхом додавання набору чисел з наступним розподілом отриманої суми на їх кількість.

2. Медіана – число, яке є серединою множини чисел, тобто половина чисел мають значення більші, ніж медіана, а половина чисел мають значення менші, ніж медіана.

3. Мода – число, що найчастіше зустрічається в даному наборі чисел.

При симетричному розподілі множини чисел ці величини оцінки ступеня централізації рівні. При асиметричному розподілі множини чисел вони можуть відрізнятися, що необхідно враховувати при розрахунках.

Коефіцієнт варіації, як відомо, виражає ступінь коливання досліджуваного параметра і визначається співвідношенням середньоквадратичного відхилення (S) до середньої величини значення параметра (\bar{X}), тобто розраховується за виразом:

$$V = \frac{S}{\bar{X}}, \quad (5)$$

де S – стандартне (середньоквадратичне) відхилення; \bar{X} – середнє арифметичне.

Для загального випадку прийнято, якщо значення коефіцієнта варіації менше 33 %, то сукупність вважається однорідною, а якщо більше 33 %, то неоднорідною. На практиці, при визначенні стабільності дугового процесу порівнянням між собою коефіцієнтів варіації за струмом і напругою, стабільнішим буде той процес, для якого ці коефіцієнти менші. Коефіцієнт варіації зазвичай виражається у відсотках.

Окрім того, часто при статистичному аналізі даних доцільно побудувати гістограму розподілу певного параметра, яка дозволяє візуально оцінити величину і характер розкиду даних. У програмі Excel гістограма розподілу – це стовпчикова діаграма, кожний стовпчик якої є інтервалом значень

(кишенею), а висота стовпчика пропорційна кількості значень у ній (частоті спостережень). Для побудови гістограми розподілу в Excel у наборі да-

них повинно бути щонайменше 50 значень. Сама гістограма створюється за допомогою надбудови «Пакет аналізу».

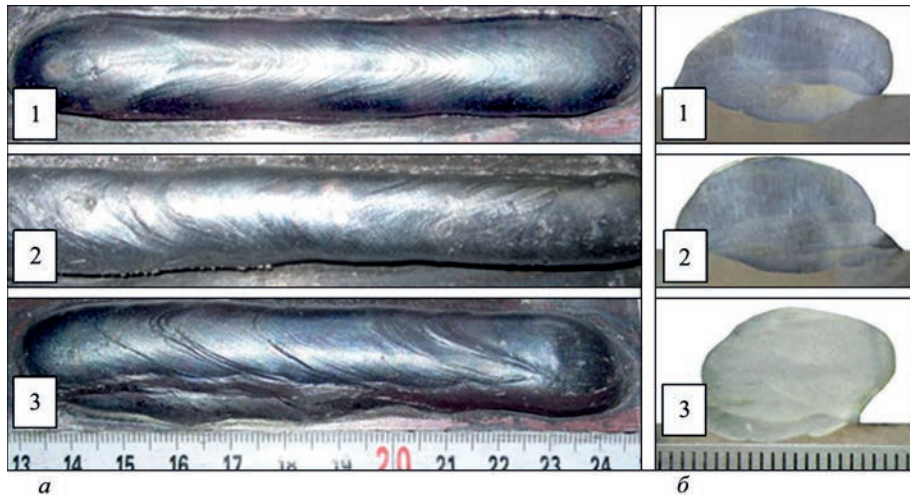


Рис. 1. Зовнішній вигляд (а) і поперечні макрошліфи (б) зразків, наплавлених у п'ять шарів дротами №№ 1–3. Позначення дротів згідно з табл. 2

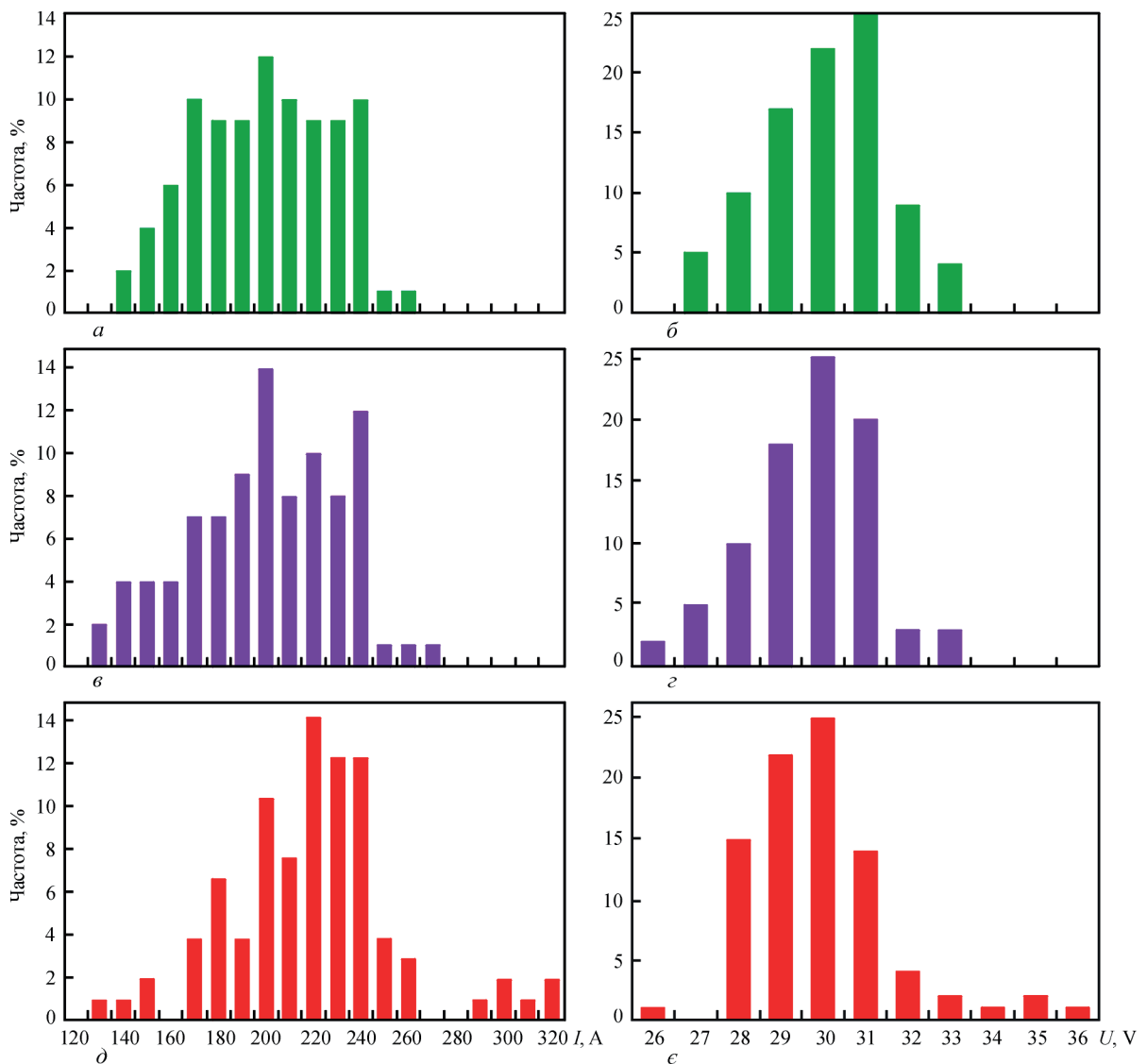


Рис. 2. Гістограми розподілу струму (а, в, д) та напруги (б, з, е) при напавленні дротами: № 1 (а, б), № 2 (в, з), № 3 (д, е). Позначення дротів згідно з табл. 2

Таблиця 2. Порівняльна оцінка зварювально-технологічних властивостей дослідних дротів і стабільності процесу дугового наплавлення дослідними дротами

№ з/п	Склад осердя порошкового дроту, розмір фракції	Характер збудження дуги	Якість формування наплавленого металу	Наявність дефектів	Відповідність хімічного складу наплавленого металу	Якість відокремлення шлакової кірки	Сумарна кількість балів	Коефіцієнти, %				
								розплавлення	наплавлення	втрат	варіації за струмом	варіації за напругою
1	Порошок ПГ-Р6М5, 50...300 мкм	2	2	2	2	1	9	17,1	16,8	1,75	14,12	4,73
2	Порошок ПГ-Р6М5, 200...250 мкм	2	1	2	2	1	8	16,2	15,8	2,47	14,71	4,99
3	Суміш порошків феросплавів, 50...300 мкм	2	1	2	2	1	8	13,6	12,6	7,35	16,18	6,08

Для прикладу в даній роботі наведено оцінку зварювально-технологічних властивостей дослідних порошкових дротів, яку виконували за розробленою методикою. Порівнювали властивості порошкових дротів з різним гранулометричним складом матеріалу осердя, в якості якого в дослідних дротах використовували гранульований металевий порошок ПГ-Р6М5 двох різних фракцій (табл. 2). В якості еталону використовували порошковий дріт з осердям із суміші феросплавних та інших компонентів, вміст яких було розраховано таким чином, щоби забезпечити отримання наплавленого металу одного хімічного складу. Зразки отримували методом дугового наплавлення під шаром флюсу АН-26П. Режими наплавлення і термообробки всіх зразків були однаковими, зразки наплавляли в п'ять шарів. Детальніше про ідею досліджень викладено в [18].

Результати оцінки зварювально-технологічних властивостей дослідних порошкових дротів наведені в табл. 2. Зовнішній вигляд наплавлених зразків наведено на рис. 1, гістограми розподілу поточних значень величин струму та напруги на дузі – на рис. 2.

Як видно з отриманих даних, оцінка зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів, які мають близькі характеристики, тільки за якісними показниками згідно з методикою [17], без урахування даних по продуктивності та стабільності процесу, дає практично однакові результати (див. сумарну кількість балів у табл. 2).

Проведення комплексного аналізу за розробленою методикою із урахуванням коефіцієнтів розплавлення, наплавлення, втрат, а також коефіцієнтів варіації за напругою та струмом і гістограмами їх розподілу, дозволило визначити підвищення продуктивності та стабільності при наплавленні дослідними порошковими дротами (№№ 1, 2) на 15...30 % у порівнянні з дротом-еталоном (№ 3).

Висновки

1. Розроблено комплексну методику порівняльної оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для дугового наплавлення, засновану на визначенні якості формування наплавленого металу, параметрів продуктивності та стабільності процесу.

2. Використання запропонованої методики дозволяє комплексно оцінити вказані властивості порошкових електродних дротів за допомогою кількісних показників, не використовуючи при цьому складних і коштовних програмно-апаратних комплексів.

3. Підтверджено, що тип і гранулометричний склад металевих компонентів осердя порошкових дротів при електродуговому наплавленні впливають на параметри та стабільність процесу, зокрема використання замість традиційних феросплавів металевих гранульованих порошків високої хімічної чистоти та однорідності за фізичними властивостями, наприклад, типу Р6М5, сприяє покращенню зварювально-технологічних властивостей порошкових електродних дротів.

Список літератури/References

- Ryabtsev, I., Fomichov, S., Kuznetsov, V. et al. (2023) *Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication*. Switzerland, Springer Nature AG. ISBN 978-3-031-34390-2. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-34390-2>
- Pokhodnya, I.K., Shlepakov, V.N., Maksimov, S.Yu., Ryabtsev, I.A. (2010) Research and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of electric arc welding and surfacing using flux-cored wire (Review). *The Paton Welding J.*, **12**, 26–33.
- Походня И.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. (1972) *Сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка. Pokhodnya, I.K., Suptel, A.M., Shlepakov, V.N. (1972) *Welding with flux-cored wire*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Походня И.К., Горпенюк В.Н., Миличенко С.С. и др. (1990) *Металлургия дуговой сварки: процессы в дуге и плавление электродов*. Киев, Наукова думка. Pokhodnya, I.K., Gorpenyuk, V.N., Milichenko, S.S. et al. (1990) *Metallurgy of arc welding: Processes in the arc and melting of electrodes*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Golovko, V., Kotelchuk, O., Naumeiko, S., Golyakevich, A.A. (2022). Development of self-shielded flux-cored wires

- for arc welding of low-alloy steels. *Defect and Diffusion Forum*, **416**, 103–114. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-58v9g5>
6. Shlepakov, V.N. (2014) Physical-metallurgical and welding-technological properties of gas-shielded flux-cored wires for welding of structural steels. *The Paton Welding J.*, **6-7**, 53–56. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.10>
 7. Kostin, O.M., Yaros, O.O., Yaros, Y.O., Savenko, O.V. (2021) UPE-500 complex for determining welding and technological characteristics of coated electrodes. *The Paton Welding J.*, **8**, 33–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.08.07>
 8. Pawlik, J., Bembenek, M., Goral, T. et al. (2023) On the influence of heat input on Ni-WC GMAW hardfaced coating properties. *Materials*, **16(11)**, 3960. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16113960>
 9. Beczkowski, R., Gucwa, M. (2017) Cladding hardfacing layers used to protect the surface against abrasive wear. In: *Proc. 26th International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, May 24–26, 1188–1193.
 10. Kakhov's'kyi, M.Y. (2016) Influence of aqueous media on the gas saturation of weld metal in the course of underwater welding of 12KH18N10T steel. *Materials Science*, **51**, 843–846. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9911-7>
 11. Zhang, M., Wang, Y., Zhang, W.-H. et al. (2018) Development of gas shielded flux cored wire for 1Cr12Ni2W1MoV stainless steel and properties of welded joint. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, **39(11)**, 129–136. DOI: <https://doi.org/10.13289/j.issn.1009-6264.2018-0215>
 12. Lankin, Yu.N. (2011) Indicators of stability of the GMAW process. *The Paton Welding J.*, **1**, 6–13.
 13. Shlepakov, V.N., Kotelchuk, A.S., Gavrilyuk, Yu.A. (2017) Modern flux-cored wires for welding of low-alloy steels of increased and high strength. *The Paton Welding J.*, **11**, 8–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.11.01>
 14. 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>
 15. Zhudra, A.P., Krivchikov, S.Yu., Dzykovich, V.I. (2014) Application of complex-alloyed powders produced by thermocentrifugal sputtering in flux-cored wires. *The Paton Welding J.*, **12**, 36–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.12.08>
 16. Voronchuk, A.P., Zhudra, A.P., Petrov, A.V., Kochura, V.O. (2019) Influence of modes of flux-cored strip surfacing on their welding-technological properties. *The Paton Welding J.*, **1**, 33–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.01.07>
 17. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Lentyugov, I.P. (2023) Welding-technological properties of flux-cored wire with boron-containing binder in the charge. *The Paton Welding J.*, **9**, 17–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.09.03>
 18. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Lentyugov, I.P. et al. (2024) Welding and technological properties of flux-cored wire with the charge in the form of granulated powder. *The Paton Welding J.*, **7**, 17–21. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.07.03>
 19. Mackenzie, J.G., Allen, M. (1998) Mathematical power tools: Maple, Mathematica, Matlab and Excel. *Chemical Engineering Education*, **32(2)**, 156–160.

METHODOLOGY FOR EVALUATING THE WELDING AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF FLUX-CORED WIRES FOR ARC SURFACING

A.A. Babinets, I.O. Ryabtsev, I.P. Lentyugov

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

E-mail: a_babinets@ukr.net

An analysis of existing methods for evaluating the welding and technological properties of electrode materials used in electric arc surfacing and welding has been conducted. The fundamental principles for assessing the stability of the arc process have been reviewed. The key approaches to studying the properties of electrode materials and the list of controlled parameters most frequently used for this purpose have been determined. It has been demonstrated that quantitative evaluation criteria are more advantageous compared to qualitative ones. Based on the analysis, a comprehensive methodology for evaluating the welding and technological properties of flux-cored wires has been developed, comprising three main components. The first component includes a visual expert assessment of the arc surfacing process and the quality of the deposited metal formation, performed using a differential scoring system. The second component focuses on evaluating the melting characteristics of flux-cored electrode wires based on experimentally determined melting rates, deposition rates, and material loss coefficients. The third component involves assessing the stability of the arc process, which is conducted using experimentally determined coefficients of variation for current and voltage fluctuations on the arc. The advantages of the proposed comprehensive methodology have been demonstrated through the evaluation of real flux-cored wires for arc surfacing. It has been established that this methodology provides more informative results compared to approaches relying solely on qualitative indicators. The study confirmed that the type and particle size distribution of metallic components in the core of flux-cored wires significantly influence the stability of the arc surfacing process. The use of chemically more pure and more homogeneous metallic granular powders in the flux-cored wire core, compared to ferroalloy powders, improves the stability and efficiency of the surfacing process by 15–30%. 19 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.

Keywords: arc surfacing, flux-cored wire, deposited metal, welding and technological properties, surfacing stability, coefficients of variation

Отримано 24.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 26.02.2025

Прийнято 03.04.2025

27–29
травня
2025



XXIII МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

Місце проведення: Україна, м. Київ, МВЦ, Броварський пр-т, 15

СПЕЦИФІКА ВИКОРИСТАННЯ ІМПУЛЬСНОЇ ДУГИ ТА ДУГИ ПОСТІЙНОЇ ПОТУЖНОСТІ В 3D ТЕХНОЛОГІЯХ НАПЛАВЛЕННЯ

Є.В. Шаповалов, А.С. Новодранов, В.М. Ващенко, О.М. Савицький, Д.Д. Топчев

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

У роботі представлені результати дослідження впливу дуги періодичної дії та дуги постійної потужності при багатошаровому наплавленні на якість наплавленого металу. Для реалізації наплавлення застосовувався комплекс обладнання на базі антропоморфного робота, оснащеного системою машинного зору. Для забезпечення високої якості наплавлення робототехнічну систему оснащено системою машинного зору на базі нейромережкових технологій для виявлення поверхневих дефектів. Показано, що кожний спосіб наплавлення має свої переваги. Багатошарове наплавлення дугою періодичної дії, за рахунок подвійного термоцикування, забезпечує в наплавленому металі дрібнозернисту структуру. Шари кристалізації фактично не проявляються. При наплавленні дугою постійної потужності монолітну структуру отримати не вдалося, шари кристалізації проявляються чітко. Проте даний спосіб характеризується вищою продуктивністю через відсутність імпульсів і пауз. Дослідження механічних властивостей показали, що в усіх випадках наплавлений низьковуглецевий метал має високі показники пластичності при достатньо високій міцності. Бібліогр. 14, табл. 6, рис. 5.

Ключові слова: 3D технологія, антропоморфний робот, система машинного зору, дуга періодичної дії, дуга постійної потужності

Вступ. В останні роки в промислово розвинутих країнах інтенсивно впроваджується у виробництво такий напрямок як 3D технології. В основі даного напрямку лежить широке застосування робототехніки та програмування для виготовлення кінцевого продукту за допомогою комп'ютерних 3D моделей виробів, що мінімізує непродуктивні витрати матеріалів, припуски на механічну обробку, якщо така взагалі потрібна, скорочує технологічний цикл виготовлення виробів. Крім цього, зводиться до мінімуму або практично повністю виключається вплив людського фактора на технологічний процес виробництва, що підвищує якість виробів та стабілізує їх експлуатаційні характеристики від виробу до виробу.

Одним із процесів, який доцільно застосовувати при виготовленні металоконструкцій із використанням 3D технологій, є дугове наплавлення в захисних газах. Даний спосіб наплавлення дозволяє в широких межах регулювати тепловий стан металу зварних з'єднань і забезпечувати високу якість наплавленого металу [1–10].

Тому головною метою роботи було порівняння впливу вказаних способів циклічного чергування нагріву та охолодження на якість наплавленого металу при багатошаровому наплавленні, у тому числі й зносостійкими матеріалами. Для цього необхідно було вирішити ряд завдань:

– обґрунтувати вибір обладнання для вирішення визначеної задачі; розробити методику ідентифікації поверхневих дефектів;

– дослідити якість формування низьковуглецевого наплавленого металу, його структуру та механічні властивості, а також твердість зносостійкого шару при наплавленні без підігріву, який вимагає додаткових енерговитрат і робочого часу.

Обладнання, матеріали та методика проведення експериментів. Для забезпечення чистоти експериментальної частини роботи необхідно звести до мінімуму вплив людського фактора на результати експериментів. Тому обладнання повинно забезпечувати максимальний рівень автоматизації процесу наплавлення. Для цього найкраще використовувати робототехнічний комплекс. До його складу входить: зварювальний антропоморфний робот Fanuc ARC Mate 100iC/7L (рис. 1, а), контролер робота (рис. 1, б), зварювальне інверторне джерело живлення (рис. 1, в), система машинного зору (рис. 1, г). Порівняно зі звичайними автоматами для зварювання або наплавлення, зварювальний робот забезпечує більшу точність позиціонування пальника, гнучкість перепрограмування на іншу задачу, а також більші можливості для автоматизації процесу наплавлення.

Антропоморфний робот призначений для автоматизації процесу наплавлення. До переваг застосування роботів при наплавленні виробів слід віднести високу точність ($\pm 0,03$ мм) відтворення запрограмованої траєкторії наплавлення, а також високу продуктивність. Висока продуктивність наплавлення за допомогою робота пояснюється можливістю безперервної роботи з високою точністю

Шаповалов Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5063-9556>, Новодранов А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>, Ващенко В.М. – <https://orcid.org/0009-0008-1476-3689>, Савицький О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-2605-9647>, Топчев Д.Д. – <https://orcid.org/0000-0002-7885-7907>

© Є.В. Шаповалов, А.С. Новодранов, В.М. Ващенко, О.М. Савицький, Д.Д. Топчев, 2025

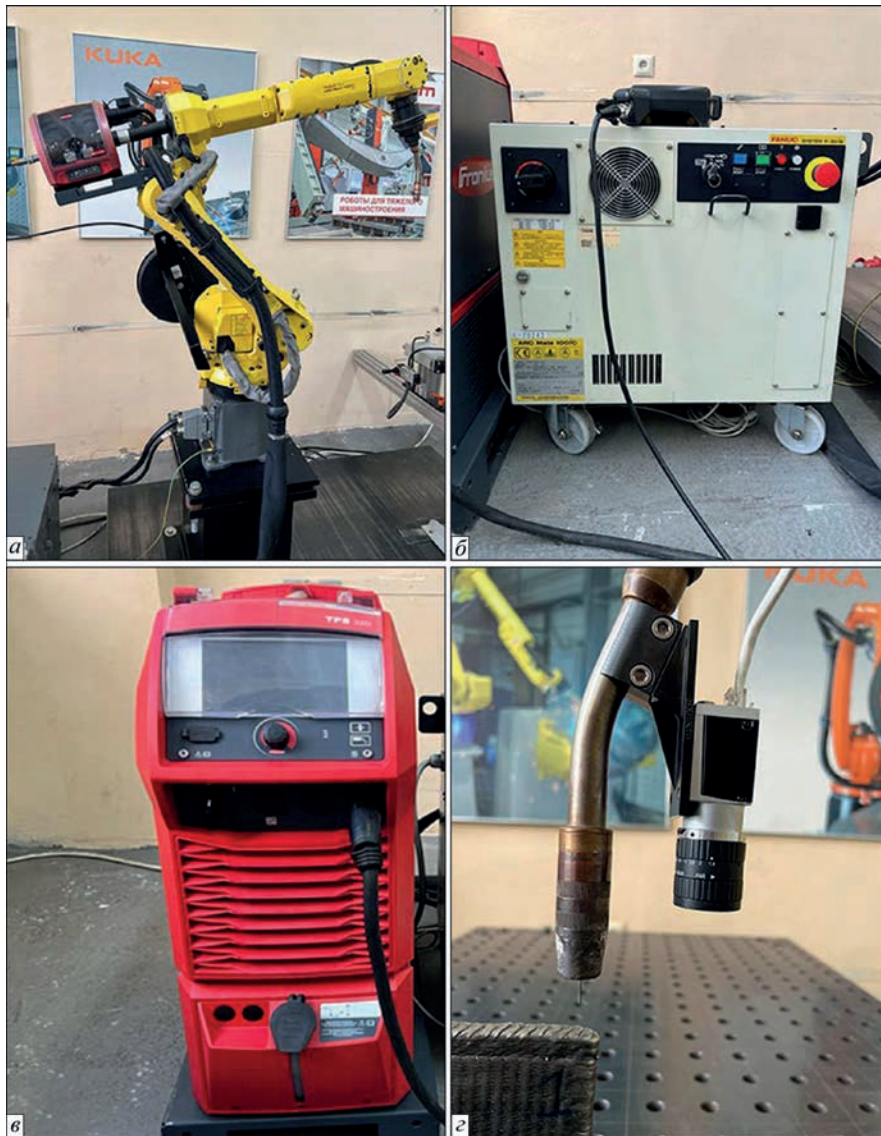


Рис. 1. Робототехнічна система: *а* – зварювальний робот; *б* – контролер роботи; *в* – зварювальне джерело живлення; *г* – система машинного зору

та швидкістю, а також автоматичним контролем параметрів наплавлення. Швидкість переміщення робота між позиціями може сягати 250 мм/с. За допомогою цифрових входів/виходів робот може динамічно змінювати швидкість подачі дроту, швидкість переміщення пальника, зварювальний струм і напругу, а також величину вильоту електрода.

Наплавлення основних шарів металу виконувалося трьома способами низьковуглецевим низьколегованим дротом суцільного перерізу Esab OK Aristo Rod 12.50 діаметром 1,2 мм, характеристики та хімічний склад якого наведено в табл. 1. В якості захисного газу використовувалася суміш 85 % Ar + 15 % CO₂.

Перший спосіб передбачав наплавлення в імпульсному режимі (дугою періодичної дії) за алгоритмом:

в імпульсі – зупинка пальника та наплавлення, в паузі – переривання дуги та переміщення пальника. Наплавлення виконувалося без коливань електрода.

Другий спосіб передбачав наплавлення в імпульсному режимі (дугою періодичної дії). На відміну від першого способу, в імпульсі відбувалося переміщення пальника та наплавлення, а в паузі – переривання дуги та зупинка. Наплавлення виконувалося із круговими коливаннями електрода.

Третій спосіб передбачав наплавлення дугою постійної потужності із круговими коливаннями електрода.

Параметри режимів наплавлення для трьох вищезазначених способів наведені в табл. 2. Між проходами відбувалося охолодження попередньо-

Таблиця 1. Характеристики дроту для наплавлення основних шарів металу

Марка дроту	Тип дроту	Діаметр дроту, мм	Хімічний склад, %		
			C	Si	Mn
Esab OK Aristo Rod 12.50	суцільного перерізу	1,2	0,10	0,72	1,11

го наплавленого шару до температури 70 °С. Кожний наступний прохід починався з точки закінчення попереднього. Після досягнення висоти наплавлених шарів, яка склала 130 мм (рис. 2, а), виконувалося наплавлення зносостійкими дротами (рис. 2, б). Характеристики та хімічний склад зносостійких дротів наведено в табл. 3, а параметри режиму наплавлення – в табл. 4. Висота зносостійких шарів склала 10 мм.

Із наплавленого металу вирізалися заготовки для виготовлення зразків для випробувань на розтягнення; вивчення макроструктури; дослідження твердості зносостійкого шару. Випробування на розтягування проводилися на зразках Ми 12 тип II при температурі + 20 °С. Заготовки для зразків вирізалися вздовж і впоперек шарів наплавлення. Твердість зносостійкого шару вимірювали методом Роквелла на приладі «ТК 2м 441» за шкалою С, з навантаженням 150 кгс за допомогою алмазного індентора.

Отримані результати та їх аналіз. Застосування антропоморфного робота для наплавлення без систем адаптації не може гарантувати належну якість наплавленого виробу. Тому при багатошаровому наплавленні застосовувалася апаратно-програмна опція TouchSense, що дозволяє визначати поточну висоту та просторову орієнтацію наплавленого виробу, а також автоматично оновлювати координати всіх точок програми наплавлення. Основна перевага застосування опції TouchSense полягає в підтриманні однакового вильоту електрода в початковій точці наплавлення. Для підтримання однакового вильоту електрода на всій траєкторії наплавлення використовувався дуговий сенсор, а також набір програмних опцій, серед яких опції автоматичного керування напругою дуги Automatic Voltage Control (AVC) і FANUC Through Arc Seam Tracking (TAST) [11]. Опція AVC (рис. 3) призначена для забезпечення стійких енергетичних параметрів режиму наплавлення шляхом аналізу напруги електричної дуги, тим самим контролюючи

Таблиця 2. Параметри режимів наплавлення основних шарів металу

Спосіб	I, A	$V_{WF}, м/с$	$U, В$	$F, Гц$	$A, мм$	$\tau_1, с$	$\tau_2, с$	$V_R, мм/с$	$\Delta, мм$
№ 1	160	6	26	–	–	1	2	4	6
№ 2	154	5,3	26	2	0,5	1	2	4	6
№ 3	154	5,3	26	2	0,3	–	–	4	–

Примітки. I – зварювальний струм; V_{WF} – швидкість подавання дроту; U – напруга дуги; F – частота коливань; A – амплітуда коливань; τ_1 – тривалість імпульсу горіння дуги; τ_2 – тривалість паузи горіння дуги; V_R – швидкість переміщення пальника; Δ – крок переміщення пальника.

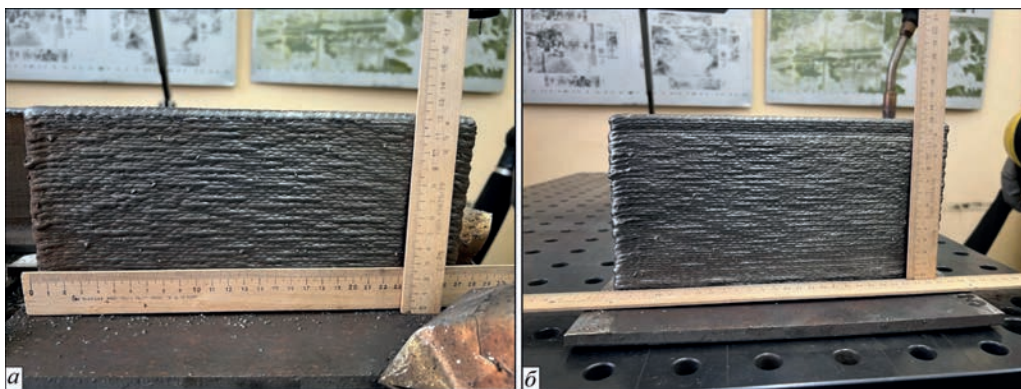


Рис. 2. Загальний вигляд зразка, наплавленого: а – низьковуглецевим низьколегованим дротом Esab OK Arisnto Rod 12.50 (висота 130 мм); б – зносостійким дротом Esab OK Autrodur 58 GM (верхній зносостійкий шар 10 мм)

Таблиця 3. Параметри дроту для наплавлення зносостійких шарів металу

Спосіб	Марка дроту	Заявлена твердість, HRC	Тип дроту	Діаметр дроту, мм	Хімічний склад, %							
					C	Si	Mn	Cr	W	Co	Mo	V
№ 1	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
№ 2	Esab OK Autrodur 58 GM	58...60	Суцільний	1,2	1,04	1,82	1,87	0,48	–	–	–	–
№ 3	Esab OK Autrodur 58 GM	58...60	Суцільний	1,2	1,04	1,82	1,87	0,48	–	–	–	–

Таблиця 4. Параметри режиму зносостійкого наплавлення

Спосіб	I, A	$V_{WF}, м/с$	$U, В$	$F, Гц$	$A, мм$	$\tau_1, с$	$\tau_2, с$	$V_R, мм/с$	$\Delta, мм$
№ 1	220	4,0	30	–	–	1	2	4	6
№ 2	154	5,3	26	2	0,5	1	2	4	6
№ 3	154	5,3	26	2	0,5	–	–	4	–

величину дугового проміжку. У випадку зміщення зварювального шва вгору або вниз відносно зварювальної траєкторії напруга дуги відповідно зменшується або зростає. Це відбувається внаслідок зміни опору дуги, що викликано зміною довжини дуги. Програмування траєкторій наплавлення може виконуватися як безпосередньо з пульта керування роботом, так і за допомогою спеціалізованого програмного пакету для моделювання Fanuc Roboguide.

При наплавленні можливе утворення таких дефектів як тріщини. Тому для гарантування повної відсутності вказаних дефектів у наплавленому шарі застосовано систему машинного зору на базі нейромережових технологій. Дана система шляхом своєчасного виявлення поверхневих дефектів сповіщає оператора робототехнічного комплексу про виявлений дефект у вигляді стоп кадру на моніторі із зазначенням типу дефекту та місця розташування, тим самим запобігаючи його розповсюдженню в наступні шари. Система машинного зору включає в себе промислову високошвидкісну камеру Basler acA1920-48gc і контролер обробки зображень. Камера оснащена протоколом передачі даних GigabitEthernet, що дозволяє досягти швидкості сканування 50 кадрів на секунду. Контролер обробки кадрів виконує функцію попередньої обробки зображень, а саме, нормалізацію яскравості та контрастності, видалення шуму та зміну розміру зображення до 640×640 пікселів. Камера жорстко закріплена позаду пальника робота, що дозволяє провести процедуру калібрування її координат відносно системи координат робота. Така процедура необхідна для подальшого визначення фізичних розмірів і розміщення дефектної області відносно наплавленого шару.

Програмну частину даної системи створено на базі моделі згорткової нейронної мережі

YOLO-NAS. Вибір даної моделі обумовлений її високою швидкістю одночасно з високим рівнем точності. Для навчання нейронної мережі зібрано 62 кольорових зображень поверхневих дефектів типу тріщина. Після розмітки дефектних зон на зображеннях і застосування методу аугментації, тобто штучного збільшення набору даних для навчання шляхом геометричних і кольорових трансформацій, отримано набір із 248 кадрів. Навчання моделі тривало 300 епох, що в реальному часі складало приблизно 4 год. Варто вказати, що тривалість навчання безпосередньо залежить від потужності обладнання, на якому воно відбувається. Результат розпізнавання дефектів на поверхні наплавленого шару представлено на рис. 4. Інформація про виявлені дефекти надається у форматі JSON для використання в подальшому в розрахунках геометричних розмірів дефектів та їх розміщення відносно наплавленого шару.

Сканування поверхні наплавленого шару виконується під час його охолодження, між проходами, що економить виробничий час. У процесі сканування система машинного зору сповіщає оператора робототехнічного комплексу в разі виявлення тріщин.

Застосований метод контролю якості показав повну відсутність гарячих тріщин у наплавлених шарах металу, в тому числі й у зносостійких. Це підтверджують також і поперечні макрошліфи (рис. 5). Видно, що тріщин, несплавлень, зашлакувань немає. Аналіз макрошліфів металу, наплавленого трьома різними способами, показує, що при наплавленні дугою періодичної дії фактично не проявляються шари кристалізації (рис. 5, а, б). Метал має дрібнокристалічну, близьку до монолітної, структуру.

При наплавленні дугою постійної потужності, навпаки, шари кристалізації проявляються чітко

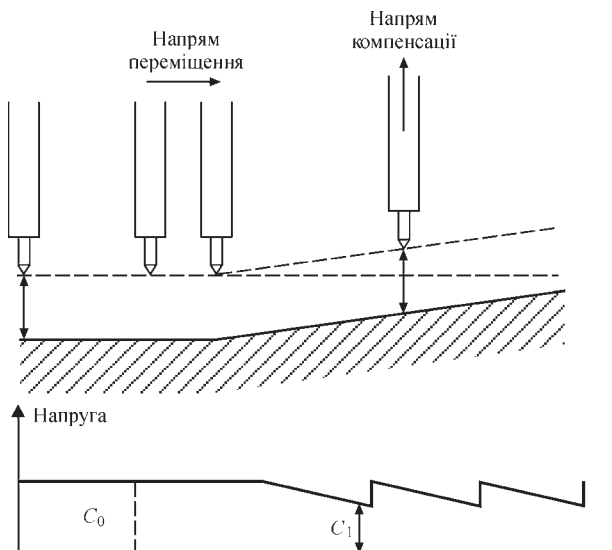


Рис. 3. Принцип роботи опції Fanuc Automatic Voltage Control: C_0 – опорна напруга; C_1 – зменшена напруга дуги внаслідок зміщення зварного шва вгору [11]



Рис. 4. Результат розпізнавання та класифікації поверхнього дефекту наплавленого шару

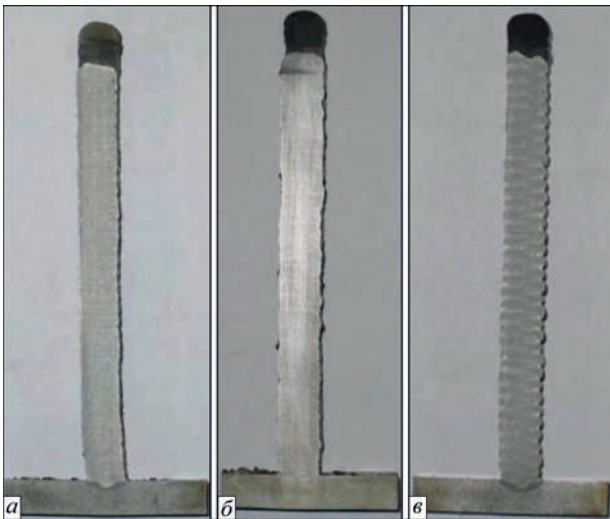


Рис. 5. Макрошліфи наплавленого металу виконаного: а, б – дугою періодичної дії; в – дугою постійної потужності

Таблиця 5. Результати випробувань на розтягування

Спосіб	Вирізка зразка	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
№ 1	Вздовж наплавлення	376,90	491,40	40,50	76,40
	Поперек наплавлення	378,60	489,90	39,67	76,90
№ 2	Вздовж наплавлення	362,70	473,50	47,07	76,10
	Поперек наплавлення	361,20	468,60	39,04	74,80
№ 3	Вздовж наплавлення	389,80	489,90	41,00	77,90
	Поперек наплавлення	381,30	487,80	43,01	77,50

Примітки. σ_r – границя текучості; σ_b – границя міцності; δ – залишкове відносне видовження; ψ – залишкове відносне звуження.

(рис. 5, в). Такі відмінності можна пояснити лише тим, що при наплавленні дугою постійної потужності циклічне чергування нагріву та охолодження металу відбувається шляхом послідовного наплавлення шарів. А при наплавленні дугою періодичної дії циклічне чергування нагріву та охолодження відбувається ще й у межах одного проходу за рахунок чергування імпульсів і пауз горіння дуги. Крім цього, при наплавленні дугою періодичної дії відбувається періодична повна кристалізація ванни, що також сприяє подрібненню кристалітів [4, 5, 7, 13, 14]. Зважаючи на це, наплавлення дугою періодичної дії має переваги перед дугою постійної потужності. Вагомою перевагою наплавлення дугою постійної потужності є більша продуктивність через відсутність імпульсів і пауз.

У табл. 5 наведено результати випробувань на розтягування. Ці дані показують, що наплавлений метал має достатньо високі, як для низьковуглецевої низьколегованої сталі, показники міцності. При цьому різниця в показниках міцності для всіх трьох способів наплавлення складає 4,6 %,

Таблиця 6. Параметри твердості зносостійких шарів

Спосіб наплавлення	Твердість, HRC				
	Замір				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
№ 1	52,0	51,5	53,0	51,0	50,5
№ 2	42,0	44,0	46,0	47,0	45,0
№ 3	40,0	42,0	44,5	45,0	45,5

тобто знаходиться в межах статистичної похибки. Наплавлений метал має також і високі показники пластичності. Різниця між відносними звуженнями для усіх трьох способів наплавлення не перевищує 3,6 %, тобто в межах статистичної похибки, а різниця між відносними подовженнями досягає 9,4 %.

Таким чином, результати пошарового контролю якості наплавленого металу із застосуванням системи машинного зору, дослідження макрошліфів і результатів механічних випробувань свідчать про високу якість металу при багатошаровому наплавленні усіма трьома способами.

У табл. 6 наведено результати визначення твердості зносостійкого шару. Порівняння цих даних із заявленою твердістю (табл. 3) показує, що тільки перший спосіб наплавлення зносостійким порошковим дротом забезпечив відповідність показників твердості, отриманих у результаті експериментів і заявлених виробником. При цьому різниця між експериментальними показниками в усіх п'яти замірах не перевищує 2,5 HRC. Проте більшість показників ближчі до нижньої межі заявленого інтервалу. У випадку наплавлення зносостійкого шару другим і третім способом, а саме дротом суцільного перерізу, його твердість суттєво нижча від заявленого інтервалу.

Висновки

1. Перевагою наплавлення дугою періодичної дії є подвійне термоциклування за рахунок циклічної зміни імпульсів і пауз, а також почергового наплавлення шарів металу, що забезпечує практично монолітний наплавлений метал. Однак при цьому продуктивність, порівняно з дугою постійної потужності, знижується в 2,3 рази.

2. Наплавлений низьковуглецевий метал має високі показники пластичності ($\delta \leq 47,7\%$, $\psi \leq 77,9\%$) при достатньо високій міцності ($\sigma_b \leq 489,9$ МПа).

3. Заміри твердості на поверхні зносостійкого шару показали, що тільки наплавлення дугою періодичної дії порошковим дротом першим способом забезпечило відповідність експериментальних показників твердості та твердості, зазначеної у технічній документації на дріт. У випадку наплавлення зносостійкого шару другим і третім способом дротом суцільного перерізу його твердість суттєво нижча від твердості, зазначеної в технічній документації на зносостійкі дроти.

4. Застосування робототехнічного комплексу з інтегрованою системою машинного зору забезпечило автоматизацію процесу наплавлення, що дозволило досягти точної відповідності геометричних розмірів наплавленого зразка до заданих при моделюванні, а також відсутності поверхневих дефектів у наплавлених шарах.

Список літератури

1. Патон Б.Е. (1974) *Технология электрической сварки плавлением*. Москва, Машиностроение.
2. Стеренбоген Ю.А., Петров П.Ф. (1979) Влияние температурного интервала кристаллизации на склонность сталей к образованию кристаллизационных трещин при сварке. *Автоматическая сварка*, 7, 10–13.
3. Savitsky, A.M., Savitsky, M.M., Novikova, D.P. (2004) Influence of welding speed and duration of periodical cooling on structure formation in welded joints of hardening steels in arc welding with thermal cycling. *The Paton Welding J.*, 8, 39–43.
4. Вагнер Ф.А. (1980) Термоциклирование при сварке вольфрамовым электродом. *Сварочное производство*, 2, 4–6.
5. Савицький О.М., Савицький М.М., Кузнецов В.Д. (2005) Технології наплавлення з керованим структуроутворенням в зварних з'єднаннях. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, 47, 24–27.
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. Савицький О.М., Савицький М.М. (2017) Вплив структури на властивості зварних з'єднань сталей, схильних до загартування. *Металознавство та обробка металів*, 4, 40–47.
8. Савицький О.М. (2005) Вплив швидкісних нагрівів на структуру вуглецевих сталей при локальній термічній дії. *Металознавство та обробка металів*, 4, 33–35.
9. Savytsky, A.M., Savytsky, M.M., Bajic, D. et al. (2018) Characteristics of structures within welding joints of hardened steel depending on the weld thermal cycle. In: *The 4th IIV South – East European Welding Congress «Safe Welded Construction by High Quality Welding»*, Belgrade, Serbia, October 10–13, pp. 1–7.
10. Прохоров Н.Н. (1976) *Физические процессы в металлах при сварке*. Москва, Металлургия.
11. FANUC Robotics America Corporation. (2013) *FANUC Robotics SYSTEM R-30iB ArcTool Setup and Operations Manual*, Document ID: MAROBAR8203131E, REV A, Version 8.20 series.
12. Савицький А.М., Савицький М.М. (2009) Управление формированием структуры металла околошовной зоны при сварке углеродистых сталей. *Праці національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Збірник наукових праць*, 3, 95–103.
13. Савицький О.М. (2006) Керування структуроутворенням у вуглецевих сталях при локальному термічному впливі. *Металознавство та обробка металів*, 3, 13–18.
14. Nazarchuk, A.T. (2000) Improvement of process of consumable electrode welding with an intermittent arc. *The Paton Welding J.*, 7, 28–31.

References

1. Paton, B.E. (1974) *Electric fusion welding technology*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Sterenbogen, Yu.A., Petrov, P.F. (1979) Influence of crystallization temperature range on the tendency of steels to form crystallization cracks during welding. *Avtomaticheskaya Svarka*, 7, 10–13 [in Russian].
3. Savitsky, A.M., Savitsky, M.M., Novikova, D.P. (2004) Influence of welding speed and duration of periodical cooling on structure formation in welded joints of hardening steels in arc welding with thermal cycling. *The Paton Welding J.*, 8, 39–43.
4. Vagner, F.A. (1980) Thermal cycling in tungsten electrode welding. *Svaroch. Proizvodstvo*, 2, 4–6 [in Russian].
5. Savitskyi, O.M., Savitskyi, M.M., Kuznetsov, V.D. (2005) Surfacing technologies with controlled structure formation in welded joints. *Bulletin of the NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»*, 47, 24–27 [in Ukrainian].
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. Savitskyi, O.M., Savitskyi, M.M. (2017) Influence of the structure on the properties of welded joints of steels prone to hardening. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 4, 40–47 [in Ukrainian].
8. Savitskyi O.M. (2005) The influence of rapid heating on the structure of carbon steels during local thermal action. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 4, 33–35 [in Ukrainian].
9. Savytsky, A.M., Savytsky, M.M., Bajic, D., Vaschenko, V.N. Shkrabalyuk, Y.M. (2018) Characteristics of structures within welding joints of hardened steel depending on the weld thermal cycle. In: *The 4th IIV South – East European Welding Congress on Safe Welded Construction by High Quality Welding*, Belgrade, Serbia, October 10–13, 1–7.
10. Prokhorov, N.N. (1976) *Physical processes in metals during welding*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. FANUC Robotics America Corporation (2013) *FANUC Robotics SYSTEM R-30iB ArcTool Setup and Operations Manual*, Document ID: MAROBAR8203131E, REV A, Version 8.20 series.
12. Savitskyi, A.M., Savitskyi, M.M. (2009) Control of the formation of the metal structure of the heat-affected zone during welding of carbon steels. *Pratsi Natsionalnoho Un-tu Korablebudivanniya*, 3, 95–103 [in Russian].
13. Savitskyi, O.M. (2006) Control of structure formation in carbon steels under local thermal influence. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 3, 13–18 [in Ukrainian].
14. Nazarchuk, A.T. (2000) Improvement of process of consumable electrode welding with an intermittent arc. *The Paton Welding J.*, 7, 28–31.

SPECIFICS OF USING PULSED ARC AND CONSTANT POWER ARCS IN 3D WELDING TECHNOLOGIES

E.V. Shapovalov, A.S. Novodranov, V.M. Vashchenko, O.M. Savytskyi, D.D. Topchev

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

The paper presents the results of the study of the influence of the periodic action and constant power arcs in multilayer surfacing on the quality of the deposited metal. An anthropomorphic robot-based equipment complex with a machine vision system was used for the surfacing process. To ensure the high quality of surfacing, the robotic system is equipped with a machine vision system based on neural network technologies to detect surface defects. It is shown that each surfacing method has its own advantages. Owing to double thermocycling, multilayer surfacing using a periodic arc ensures a fine-grained structure in the deposited metal. Crystallisation layers are almost invisible. It was impossible to produce a monolithic structure in surfacing using a constant power arc, and the crystallisation layers were clearly visible. However, this method is characterised by higher efficiency due to the absence of pulses and pauses. Studies of mechanical properties have shown that in all cases the deposited low-carbon metal has high indices of ductility at sufficiently high strength. 14 Ref., 6 Tabl., 5 Fig.

Keywords: 3D technology, anthropomorphic robot, machine vision system, periodic arc, constant power arc

Отримано 25.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 21.01.2025

Прийнято 04.03.2025

САНІТАРНО-ГІГІЄНІЧНА ОЦІНКА РІВНЯ ШУМУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

В.А. Кулешов, А.Г. Покляцький

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

У роботі представлено результати досліджень характеристик акустичного шуму під час зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП, зарубіжний аналог – FSW) алюмінієвих сплавів 1460 (Al–Cu–Li) і 1201 (Al–Cu) з метою створення рекомендацій для поліпшення санітарно-гігієнічних характеристик на робочому місці оператора-зварника. Встановлено, що величина рівня шуму на робочому місці при ЗТП з частотою обертання інструмента 1420 об/хв дорівнює $83,3 \pm 1$ дБА для сплаву 1460 і $80,2 \pm 1$ дБА для сплаву 1201. Рекомендовано застосування спеціальних методів і засобів захисту від шуму. Бібліогр. 9, табл. 4, рис. 2.

Ключові слова: алюмінієві сплави 1460 та 1201, зварювання тертям з перемішуванням, рівень акустичного шуму, захист від шуму

Вступ. У роботі досліджені фізичні характеристики такого шкідливого фактору, як акустичне випромінювання, під час зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів 1460 (Al–Cu–Li) і 1201 (Al–Cu) та надано рекомендації для застосування спеціальних методів і засобів захисту від небезпечного шуму на робочому місці оператора-зварника. Роботу можна розглядати як продовження [1], в якій проведено, зокрема, порівняльне дослідження акустичного шуму під час механізованого аргонодугового зварювання неплавким електродом (АДЗНЕ, зарубіжний аналог – TIG) сплавів 1460 і 1201.

Методика досліджень. Дослідження санітарно-гігієнічних характеристик шуму на робочому місці проводилися у лабораторних умовах. В якості зварюваних матеріалів використовували високоміцні алюмінієві сплави 1460 і 1201, які широко застосовуються при виготовленні конструкцій відповідального призначення у різних галузях машинобудування [2, 3]. Хімічний склад і границя міцності сплавів наведені в табл. 1.

Процес зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) здійснювали на розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона лабораторній установці, яка дозволяє отримувати стикові з'єднання листів високоміцних алюмінієвих сплавів завтовшки до 2,5 мм. Частотою

обертання інструмента становить 1420 об/хв, а швидкість його лінійного переміщення (швидкість зварювання) може регулюватися в межах 7...38 м/год. Зварювали стикові з'єднання листів сплавів завтовшки лише 2 мм. Оскільки для оцінки механічних властивостей з'єднань необхідно було отримати високоякісні шви, то зварювання здійснювали зі швидкістю 14 м/год, за якої забезпечуються оптимальні умови для їх формування [4]. При цьому використовували спеціальний зварювальний інструмент з діаметром бурта 12 мм і наконечником конічної форми діаметром 3,4 мм в основі [5].

Перед зварюванням проводили хімічне травлення листів за загальноприйнятою технологією. Після чого здійснювали механічне зачищення торців зварюваних кромок і поверхневих шарів завтовшки 0,10...0,15 мм, щоб уникнути утворення пор у зварних з'єднаннях.

Листи завтовшки 2 мм, завдовжки 400 мм і завширшки 200 мм розміщували таким чином, щоб зварні шви були орієнтованими вздовж напрямку їх прокату. Датчик шуму знаходився на відстані 0,55 м від центру місця зварювання. У процесі отримання стикових з'єднань у нижньому положенні на горизонтальній площині точка зварювання наближалася до датчика випромінювання, а потім – віддалялася. Дослідження проводилися у закрито-

Таблиця 1. Хімічний склад і границя міцності алюмінієвих сплавів 1460 і 1201 відповідно до ГОСТ 4784-97

Марка сплаву	Масова частка хімічних елементів, % (основа – Al)												Границя міцності σ_B , МПа
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Li	Sc	Інші	
1460	0,10	0,15	2,6...3,3	0,1	0,1	0,05	0,25	0,01...0,06	0,06...0,15	2,0...2,5	0,05-0,14	0,008...0,1 Be	504
1201	0,20	0,30	5,8...6,8	0,2...0,4	0,2	–	0,1	0,02...0,1	0,10...0,25	–	–	0,05...0,15 V	427

Кулешов В.А. – <https://orcid.org/0000-0001-7518-7429>, Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>

© В.А. Кулешов, А.Г. Покляцький, 2025

му приміщенні без витяжної вентиляції; відстань від підлоги до верху пластини становила 100 см; температура повітря ~ 15 °С при середній відносній вологості.

Для вимірювання шумових характеристик використовувався точний інтегруючий вимірювач рівня звуку моделі 2230 фірми Brüel & Kjær (Precision Integrating Sound Level Meter Type 2230) першого класу точності. Прилад дозволяє визначити еквівалентний рівень звуку L_{eq} , а також максимальний $L_{p\ max}$ і мінімальний $L_{p\ min}$ рівень звуку з точністю до 1 дБ.

Санітарно-гігієнічна оцінка шуму на робочому місці проводилась у відповідності до вимог ДСН 3.3.6.037-99 [6]. Згідно із встановленими нормами для визначення впливу шуму на робочий персонал достатньо двох вимірюваних величин: еквівалентного рівня звуку L_{eq} у дБА та максимального рівня звуку $L_{p\ max}$ у дБА. Під час санітарно-гігієнічної оцінки шуму на робочому місці зварника прийнято, що при 8-годинній робочій зміні гранично допустимий рівень (ГДР) шуму дорівнює $L_{eq} = 80$ дБА; максимальний рівень звуку не повинен перевищувати 110 дБА.

Додатковим джерелом шуму під час проведення вимірювань було допоміжне устаткування: механізм лінійного переміщення столу із закріпленнями на ньому зварюваними пластинами, механізм обертання інструмента, джерело живлення; вентиляційне обладнання було вимкнено. Оскільки у вимірюваному шумі $L_{вим}$ поряд зі зварювальним шумом $L_{зв}$, який генерує зварювальний процес, був присутній і фоновий шум $L_{фон}$, вироблений допоміжним обладнанням, для оцінки його внеску окремо проводилися вимірювання його акустичних характеристик. Мікрофон знаходився на висоті 1,5 м над рівнем поверхні, на якій стоїть працівник, і на відстані 0,55 м від середини зварного шва та віддалений не менш ніж на 0,5 м від оператора, який проводив вимірювання.

Таблиця 2. Параметри шуму $L_{вим}$ при ЗТП сплаву 1460

Номер виміру	Шум при зварюванні $L_{вим}$, дБА		
	L_{eq}	$L_{p\ max}$	$L_{p\ min}$
1	82,7	94,0	81,1
2	83,1	90,6	80,9
3	83,4	100,3	81,6
4	83,5	84,6	81,3
5	83,5	87,4	81,4
6	83,4	85,2	81,4
7	83,6	90,5	82,1
8	83,5	84,6	82,1
Фоновий шум $L_{фон}$, дБА			
	81,6	85,3	81,0

Вимірювання шуму при ЗТП сплаву 1460. Параметри шуму, що утворюються під час ЗТП, і фонового шуму $L_{фон}$ наведені у табл. 2.

З аналізу даної серії вимірювань видно, що шум є непостійним для вимірів з №№ 1–3, 5, 7 оскільки $L_{p\ max} - L_{p\ min} \geq 5$ дБА і, навпаки, постійним для вимірів з № 4, 6, 8 [6]. Дотримуючись алгоритму обчислення погрішності вимірів [7], знайдемо, що дійсна величина рівня шуму на робочому місці дорівнює $83,3 \pm 1$ дБА, погрішність вимірів визначається винятково інструментальною помилкою.

З даних табл. 2 випливає, що $L_{вим} - L_{фон} \approx 3$. Можна показати [6], застосовуючи принцип адитивності енергетичних потоків від різних джерел шуму, що величина зварювального шуму $L_{зв} = 10 \cdot \log(10^{0,1 \cdot L_{вим}} - 10^{0,1 \cdot L_{фон}}) = 10 \cdot \log(10^{8,33} - 10^{8,16}) \approx 78,4$ дБА. Таким чином, рівень зварювального шуму на робочому місці при ЗТП сплаву 1460 не перевищує величину ГДР. Основним джерелом шуму на робочому місці є допоміжне устаткування.

Розглянемо характер впливу на шум такого технологічного параметра процесу, як швидкість переміщення столу. Рівень шуму, що генерується при частоті обертання інструмента 1420 об/хв за відсутності переміщення столу, $L_{оо} = 79,2$ дБА. Рівень шуму, що генерується при переміщенні інструмента (обертання відсутнє) на швидкостях 14...32 м/год, наведено в табл. 3.

Використовуючи засоби аналізу даних MS Excel, отримуємо квадратичну залежність рівня шуму від величини швидкості переміщення (рис. 1), яка визначається виразом (1) та представлена графічно на рис. 1.

$$L_{пер} = -0,0167 \cdot (V_{пер})^2 + 1,15 \cdot V_{пер} + 65,617 \quad (1)$$

При цьому квадрат величини лінійної кореляції ($R^2 = 0,998$) вказує на дуже високу вірогідність отриманої залежності [7]. Зазначимо слабку залежність рівня шуму від швидкості переміщення столу: при збільшенні швидкості переміщення ~ 130 % рівень шуму підвищився тільки на 21 %.

Оцінимо швидкість переміщення, за якої рівень вимірюваного шуму буде меншим граничної величини 80 дБА. Знайдемо, що рівень шуму від переміщення столу повинен бути близько 72 дБА:

Таблиця 3. Параметри шуму від столу $L_{пер}$, що переміщується, без обертання інструмента

Швидкість переміщення $V_{пер}$, м/год	$L_{пер}$, дБА		
	L_{eq}	$L_{p\ max}$	$L_{p\ min}$
14	78,4	82,1	77,3
20	82,1	83,2	70,8
26	84,1	85,6	76,3
32	85,4	87,8	75,8

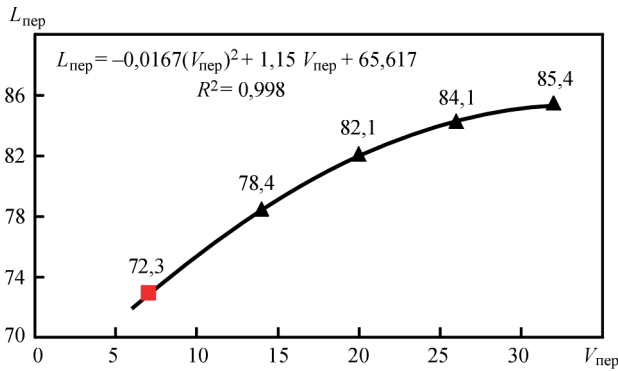


Рис. 1. Залежність рівня шуму $L_{пер}$ від величини швидкості переміщення столу $V_{пер}$ без обертання інструмента: \blacktriangle – величина виміряного шуму; \blacksquare – прогноз

$$L_{пер} = 10 \cdot \log(10^{L_{зв}/10} - 10^{L_{об}/10}) = 10 \cdot \log(10^{80/10} - 10^{79,2/10}) \approx 72,3 \text{ дБА} \quad (2)$$

Як витікає з (1), такий рівень шуму буде утворюватися при швидкості переміщення столу близько 7 м/год (рис. 1). Таке зменшення швидкості зварювання практично не вплине на фізико-механічні властивості зварних з'єднань, але сприятиме зменшенню ймовірності виникнення характерних для цього способу зварювання дефектів. Таким чином, зварювання тертям з перемішуванням сплаву 1460 завтовшки 2,0 мм з частотою обертання 1420 об/хв і швидкістю зварювання 14 м/год є небезпечним і вимагає застосування спеціальних методів і засобів захисту від шуму.

Шум при ЗТП сплаву 1201. При ЗТП сплаву 1201 було змінено лише один технологічний параметр – швидкість зварювання, він зменшений до 12 м/год.

Параметри шуму, що утворюються при зварюванні тертям з перемішуванням, наведені у табл. 4.

Оскільки $L_{p \max} - L_{p \min} \leq 5$ дБА, шум є постійним при всіх вимірах і його величина дорівнює $80,2 \pm 1$ дБА. Тоді $L_{зв} = 10 \cdot \log(10^{0,1 \cdot L_{вим}} - 10^{0,1 \cdot L_{фон}}) = 10 \cdot \log(10^{8,02} - 10^{7,93}) \approx 73,0$ дБА. Отже, рівень зварювального шуму на робочому місці при ЗТП сплаву 1460 не перевищує величину ГДР. Основним джерелом шуму на робочому місці є допоміжне устаткування.

Таким чином, рівень виміряного шуму на робочому місці при ЗТП сплаву 1201 завтовшки 2,0 мм з частотою обертання 1420 об/хв і швидкістю зварювання 12 м/год не перевищує величину ГДР.

Таблиця 4. Параметри шуму $L_{вим}$ при ЗТП сплаву 1201

Номер виміру	$L_{вим}$, дБА		
	L_{eq}	$L_{p \max}$	$L_{p \min}$
1	80,5	81,6	79,6
2	79,9	80,9	79,1
3	80,1	81,0	79,1
4	80,2	81,1	79,0
Фоновий шум $L_{фон}$, дБА			
	79,3	80,6	78,6

рування 12 м/год незначно перевищує величину ГДР і вимагає застосування спеціальних методів і засобів захисту від шуму.

Порівняльний аналіз отриманих результатів. Представимо результати вимірів рівнів шуму, генеровані під час зварювання сплавів 1460 і 1201, графічно (рис. 2). Вони відрізняються приблизно на 3 дБА, хоча в обох випадках величини технологічних параметрів практично рівні (відрізняються лише швидкості переміщення зварювального столу на 2 м/год). Проаналізуємо причини такої розбіжності. Спочатку розглянемо вплив швидкості переміщення столу. Підставляючи значення швидкості 12 і 14 м/год у рівняння (1), знаходимо, що різниця між рівнями шуму, генерованого переміщенням столу, не перевищує 1,4 дБА. Тобто, переміщення столу – це не єдина причина відмінності рівнів шуму. Інша причина – вплив механічних властивостей сплавів на процес генерації шуму при терті з перемішуванням. Дійсно, згідно з табл. 1, відмінність у міцності алюмінієвих сплавів складає близько двадцять відсотків.

З табл. 1, 2 і 4 видно, що міцність сплавів також впливає на характер протікання процесу зварювання: він стійкіший у менш міцного сплаву 1201.

Зауважимо, що при АДЗНЕ сплавів 1460 і 1201 шум досить сильний (95...99 дБА) при величині номінального зварювального струму 140...260 А. За санітарно-гігієнічною оцінкою такого шкідливого фактору, як акустичний шум, технологія ЗТП, що належить до механічного класу зварювальних технологій, має явну перевагу перед технологією АДЗНЕ, яка належить до термічного класу. Можна припустити, що це твердження є правильним і для інших зварювальних технологій зазначених класів.

Методи та засоби захисту від шуму. ЗТП алюмінієвих сплавів 1460 і 1201 вимагає застосування спеціальних методів і засобів захисту від шуму зварників та оточуючого персоналу, оскільки рівні шуму на робочому місці оператора-зварника вищі

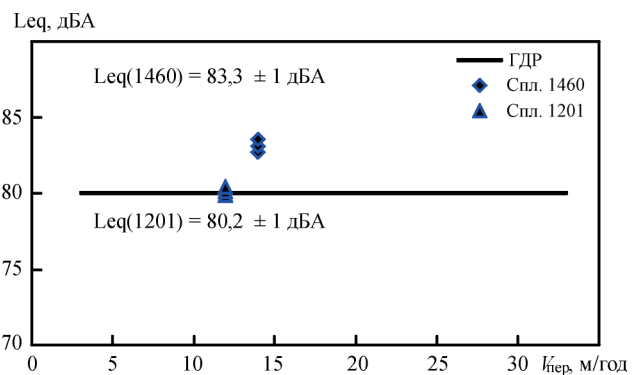


Рис. 2. Рівень шуму при зварюванні тертям з перемішуванням сплавів 1460 і 1201 (частота обертання зварювального інструмента – 1420 об/хв): \blacklozenge – сплав 1460; \blacktriangle – сплав 1201; $L_{eq}(1460) = 83,3 \pm 1$ дБА; $L_{eq}(1201) = 80,2 \pm 1$ дБА

за ГДР = 80 дБА і можуть досягати 84,3 дБА для сплаву 1460 і 81,2 дБА для сплаву 1201. Засоби та методи зниження шуму підрозділяються на засоби та методи колективного захисту та засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) [8].

Засоби колективного захисту по відношенню до джерела збудження шуму підрозділяються на засоби, що знижують шум у джерелі його виникнення, і засоби, що знижують шум на шляху його поширення від джерела до об'єкта, що захищається. ЗІЗ захищає безпосередньо орган слуху (вухо), послаблюючи рівні звуків, що діють на барабанну перетинку. Ми обмежимося розглядом кількох способів захисту від шуму, в першу чергу незатратних. Одним із способів зниження шуму в джерелі виникнення є зміна величин технологічних параметрів зварювання, які впливають на рівень шуму. Як випливає з (1) і (2), рівень шуму можна знизити до безпечної величини без втрати якості зварювання, значно зменшивши швидкість переміщення столу.

Два інших, простих і незатратних, методів боротьби з шумом є «захист часом» і «захист відстанню». Так званий «захист часом» дає можливість так організувати роботу, щоб сумарний шумовий вплив на працівника за робочу зміну був нешкідливим для його здоров'я. При «захисті відстанню» визначають безпечні за шумом зони. Це вкрай важливо при дистанційно керованих і механізованих зварювальних роботах.

Розглянемо метод «захисту часом». Якщо рівень шуму перевищує ГДР, то безпечні умови роботи зберігаються при відповідному скороченні часу перебування в такій шумовій обстановці: для збереження тієї ж дози шуму треба його скорочувати [6]. Тому, наприклад, при рівні шуму 83,0 дБА тривалість безперервної роботи не повинна перевищувати 4 год. Дійсно, шуми з рівнями звуку L_1 і L_2 , що діють протягом часу T_1 і T_2 відповідно, генерують однакову дозу шуму, якщо виконується співвідношення:

$$T_2 = 10^{0,1(L_1 - L_2)} \cdot T_1. \quad (3)$$

Тоді при $L_1 = 80$ дБА та $L_2 = 83$ дБА маємо $T_2 = 10^{-0,3} T_1 \approx 0,50 T_1$. Якщо тривалість робочої зміни $T_1 = 8$ год, то $T_2 = 4$ год.

У нашому випадку при $L_2 = 84,3$ дБА отримуємо $T_2 = 10^{-0,43} T_1 \approx 0,76 \cdot 8$ год ≈ 6 год; при $L_2 = 81,2$ дБА отримуємо $T_2 = 10^{-0,12} T_1 \approx 0,37 \cdot 8$ год ≈ 3 год.

Це означає, що тривалість безперервної роботи на робочому місці на відстані 0,55 м від робочого інструмента при ЗТП сплаву 1201 не повинна перевищувати 6-ти год, а при ЗТП сплаву 1460 – 3-х год.

Визначення межі безпечної за шумом робочої зони можливе, але в даній роботі не проводилося. Для визначення дистанції від місця зварювання до межі безпечної зони проведемо її теоретичну оцін-

ку. Джерело шуму будемо розглядати як точкове, отже, звукову хвилю як сферичну, яка поширюється у вільному звуковому полі, де немає відбитків і дисипації звукової енергії. На дистанціях r_1 і r_2 від джерела шуму рівні шуму будуть L_1 і L_2 . Із закону про збереження енергії звукової хвилі при r_1 і r_2 [9] отримуємо наступне співвідношення:

$$r_2 = 10^{0,05(L_1 - L_2)} \cdot r_1. \quad (4)$$

Підставляючи у (4) виміряну величину рівня шуму $L_1 = 84,3$ дБА на дистанції $r_1 = 0,55$ м і $L_2 = 80$ дБА, знаходимо відстань до безпечної зони $r_2 = 10^{0,05 \cdot 4,3} \cdot 0,55$ м $\approx 0,9$ м при зварюванні сплаву 1460. Аналогічно при зварюванні сплаву 1201 відстань до безпечної зони буде $r_2 = 10^{0,05 \cdot 1,2} \cdot 0,55$ м $\approx 0,6$ м.

Для механізованого ЗТП алюмінієвих сплавів 1460 і 1201 отримано цілком прийнятні величини безпечних зон у конкретних виробничих умовах. Очевидно, що порівняно зі способом зниження шуму шляхом зменшення швидкості зварювання спосіб «захисту відстанню» економічно вигідніший. Таким чином, можна рекомендувати метод «захисту відстанню» як ефективніший спосіб захисту при ЗТП.

Висновки

При виконанні досліджень встановлено, що:

1. При зварюванні тертям з перемішуванням на лабораторній установці сплавів 1460 і 1201 завтовшки 2,0 мм з частотою обертання 1420 об/хв еквівалентний рівень шуму на робочому місці незначно перевищує величину 80 дБА для сплаву 1201 і є небезпечним при зварюванні сплаву 1460.

2. При зварюванні тертям з перемішуванням рівень шуму залежить від механічних властивостей сплавів. Процес зварювання рівномірніший у менш міцного сплаву 1201, ніж у 1460.

3. Механізоване зварювання тертям з перемішуванням досліджуваних високоміцних алюмінієвих сплавів 1460 і 1201 вимагає застосування спеціальних методів і засобів захисту від шуму. Рекомендовано знижувати вплив шуму на робочий персонал до безпечної величини за допомогою методу «захисту відстанню».

Список літератури

1. Лук'яненко А.О., Кулешов В.А., Покляцький А.Г. (2024) Санітарно-гігієнічна оцінка шуму при механізованому аргонодуговому зварюванні неплавким електродом алюмінієвих сплавів. *Автоматичне зварювання*, 1, 67–71. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.01.08>
2. Белецький В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) Справочник*. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, КОМИНТЕХ.
3. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Київ, Наукова думка.
4. Покляцький А.Г. (2019) Прогнозування параметрів процесу зварювання тертям з перемішуванням тонколисто-

вих алюмінієвих сплавів. *Автоматичне зварювання*, **8**, 53–59. DOI: <http://doi.org/10.15407/as2019.08.06>

5. Іщенко А.Я., Покляцький А.Г. (2010) *Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів*. Пат. 54096 Україна, МПК В23К 20/12; № u201005315; заяв. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
6. (1999) ДСН 3.3.6.037-99 *Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку*.
7. Тейлор Дж. (1985) *Введение в теорию ошибок*. Москва, Мир.
8. Левченко О.Г., Полукаров О.І., Зацарний В.В. та ін. (2019) *Охорона праці та цивільний захист. Підручник*. Левченко О.Г. (ред.). Київ, Основа.
9. Грінченко В.Т., Вовк Ш.В., Маципура В.Т. (2007) *Основи акустики*. Київ, Наукова думка.

2. Beletsky, V.M., Krivov, G.A. (2005) Aluminium alloys (Composition, properties, technology, application): Refer Book. Ed. by I.N. Friedlander. Kyiv, COMINTECH [in Russian].
3. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures of aluminium alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Poklyatskii, A.G. (2019) Prediction of parameters of friction stir welding of sheet aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **8**, 37–42. DOI: <http://doi.org/10.15407/tpwj2019.08.06>
5. Ishchenko, A.Ya., Poklyatskyi, A.G. (2020) *Tool for friction stir welding of aluminium alloys*. Pat. 54096 Ukraine, Int. Cl. B23K 20/12; PWI, No. u201005315, fill. 30.04.2010, publ. 25.10.2010 [in Ukrainian].
6. (1999) SN 3.3.6.037-99: *Sanitary standards of production noise, ultrasound and infrasound*. Introd. 01.12.1999 [in Ukrainian].
7. Taylor, J. (1985) *Introduction to theory of errors*. Moscow, Mir [in Russian].
8. Levchenko, O.G., Polukarov, O.I., Zatsarny, V.V. et al. (2019) *Occupational safety and civil protection: Textbook*. Ed. by O.G. Levchenko. Kyiv, Osнова [in Ukrainian].
9. Grinchenko, V.T., Vovk, Sh.V., Matsypura, V.T. (2007) *Basics of acoustics*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].

References

1. Lukyanenko, A.O., Kuleshov, V.A., Poklyatskyi, A.G. (2024) Sanitary and hygienic assessment of noise at nonconsumable electrode mechanized argon-arc welding of aluminium alloys. *Avtomatychne Zvaryvannya*, **1**, 67–71 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.01.08>

SANITARY AND HYGIENIC ASSESSMENT OF NOISE LEVELS DURING FRICTION STIR WELDING OF ALUMINIUM ALLOYS

V.A. Kuleshov, A.G. Poklyatskyi

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

E-mail: kuleshovva@ukr.net

The paper presents the results of research on the characteristics of acoustic noise during friction stir welding (FSW) of aluminium alloys 1460 (Al-Cu-Li) and 1201 (Al-Cu) in order to create recommendations for improving sanitary and hygienic characteristics at the welder’s workplace. It was established that the noise level at the workplace during FSW with a tool rotation frequency of 1420 rpm is 83.3 ± 1 dBA for 1460 alloy and 80.2 ± 1 dBA for 1201 alloy. The use of special methods and means of protection against noise is recommended. 9 Ref., 4 Tabl., 2 Fig.

Keywords: aluminium alloys 1460 and 1201, friction stir welding, occupational safety, acoustic noise level, noise protection

Отримано 12.02.2025

Отримано у переглянутому вигляді 19.03.2025

Прийнято 14.04.2025

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електromеталургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

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

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

Передплата на електронну версію журналів. Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf.

На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90

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

ПОРОШКОВІ ДРОТИ І СТРІЧКИ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ ТА РІЗАННЯ

Розвиток металургії машинобудування, будівництва та інших галузей промисловості у другій половині минулого століття вимагав створення нових матеріалів для зварювання, наплавлення та різання конструкційних, корозійностійких і зносостійких сталей та сплавів різних систем легування.

Ідею створення «трубчастого електрода з серцевиною із різного типу порошків» висунув у 1885 р. винахідник першого способу електродугового зварювання М.М. Бенардос. Необхідно було створити порошок дріт, що забезпечував би стійкий дуговий процес, газовий і шлаковий захист розплавленого металу, задовільне формування швів (наплавленого металу), легке відділення шлакової кірки, необхідне проплавлення основного металу, мінімальне розбризкування електродного або присадного дроту, відсутність у швах пор, тріщин, включень та інших дефектів, необхідний хімічний склад металу шва, задані його механічні та службові властивості.

На початку 1950-х років у ІЕЗ ім. Є.О. Патона І.І. Фрумін та І.К. Походня запропонували використовувати для наплавлення порошок дріт. Було запропоновано формувати трубку з пластичної стрічки, у середину якої насипається шихта у вигляді суміші порошків феросплавів, металів і мінеральних компонентів для боротьби з порами та іншими дефектами у наплавленому металі. В ІЕЗ почали інтенсивно розвиватися дослідження, розробка та виготовлення порошкових дротів для електродугового зварювання, наплавлення, а також різання. Виготовляються порошкові дроти для зварювання та наплавлення під флюсом, у захисних газах та самозахисні, в яких газозлакоутворюючі компоненти вводяться безпосередньо в шихту дроту.

Для виготовлення порошкового дроту в ІЕЗ було запропоновано використовувати волочіння – досить простий і продуктивний процес. Перший однобарабанний лабораторний стан для виробництва порошкового дроту в ІЕЗ був зібраний майстром В.С. Ширіним.

Порошкові дроти для наплавлення

У 1950-і роки І.І. Фрумін та І.К. Походня зробили перший порошок дріт для дугового наплавлення під флюсом сталевих прокатних валків ПП-Нп-35В9Х3СФ (сучасна назва ПП-Нп-35В9Х3ГСФ).

Перший промисловий чотирибарабанний стан для виробництва порошкового дроту був запущений співробітниками ІЕЗ. На Краматорському вер-

статобудівному заводі було впроваджено серійне виробництво верстатів для наплавлення різного призначення.

Наплавлення прокатних валків запровадили: на Дніпропетровському трубопрокатному заводі, Сінарському трубному заводі, Магнітогорському, Комунарському металургійних комбінатах та багатьох інших підприємствах країни.

В ІЕЗ розроблено значну кількість порошкових дротів і технології наплавлення дротом під флюсом, відкритою дугою та у захисних газах деталей різних машин і механізмів з контрольованим легуванням наплавленого металу. У тому числі, для наплавлення: прокатних валків, штампів холодного та гарячого штампування та різання (І.І. Фрумін, І.О. Кондратьєв, В.А. Антонов); головок поршнів ДВЗ (Г.С. Мікаелян, П.В. Гладкий); плунжерів гідропресів, роликів машин безперервного лиття заготовок (І.І. Фрумін, П.В. Гладкий, Л.І. Опа-

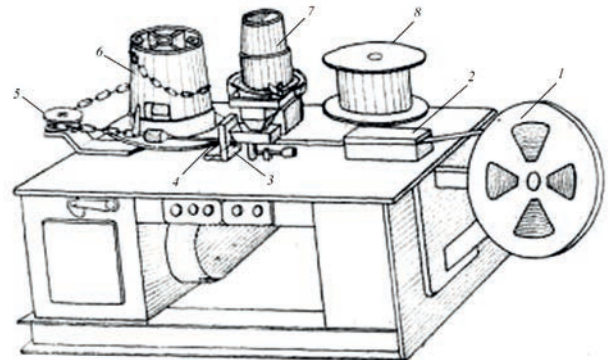
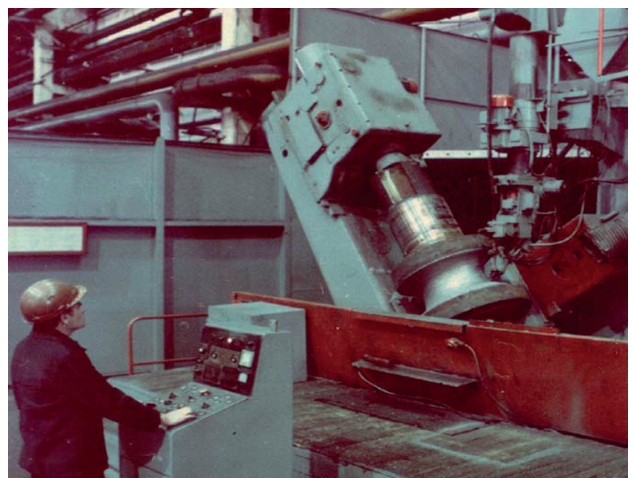


Схема лабораторного верстата для виготовлення порошкового дроту: 1 – котушка з мотком стрічки; 2 – пристрій для очищення стрічки; 3 – пристрій для волочильного мастила; 4 – фільера; 5 – перекидний блок для захоплення дроту перед волочінням; 6 – приводний барабан; 7 – тарілчастий живильник для подачі шихти; 8 – котушка для готового дроту



Наплавлення валка пільгер-стану на верстаті КЖ-9710



Напівавтоматичне наплавлення хрестовини стрілочних переводів порошковим дротом ПП-АН105 та наплавлена хрестовина рін, В.Л. Малікін); гідрокріплів (І.О. Рябцев, П.В. Гладкий, Ю.М. Кусков); деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування (І.О. Кондратьєв, І.О. Рябцев, Ю.М. Кусков); валів, осей, кранових коліс тощо (І.І. Рябцев); важконавантажених деталей пар тертя (В.К. Каленський, Я.П. Черняк, І.О. Рябцев).

Порошкові драти для зварювання

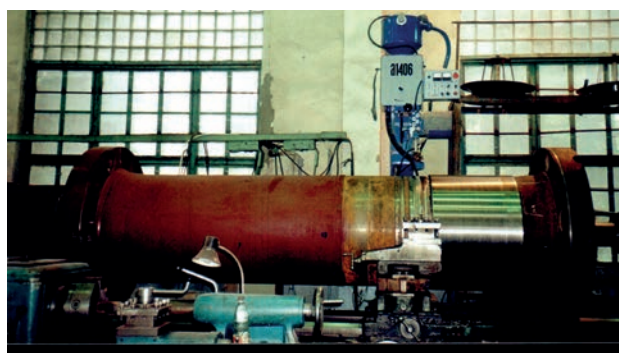
У 1958 р. в ІЕЗ було організовано лабораторію під керівництвом І.К. Походні з вивчення процесів плавлення та перенесення електродного металу при дуговому зварюванні. Було розпочато вивчення кінетики плавлення та перенесення електродного металу, встановлено особливості окислювально-відновлювальних реакцій взаємодії між металом, шлаком і газовою фазою, запропоновано методи управління цими процесами, що забезпечують видалення продуктів реакцій із зварювальної ванни, оптимальне легування металу зварювальної ванни, високі механічні властивості зварних з'єднань. У результаті досліджень створено низку самозахисних порошкових дратів різного призначення, що характеризуються оригінальними композиціями та конструкціями оболонки. Розробка самозахисних порошкових дратів стала принципово новим кроком у техніці та технології зварювального виробництва. Їх застосування дозволило розв'язати проблему механізації зварювальних процесів при монтажі, у відкритих цехах, у польових умовах, на стапелях. Так було винайдено новий ефективний напрям механізації дугового зварювання.

Вже у 1959 р. І.К. Походня, разом із співробітниками (В.М. Шлепаков, О.М. Суптель, В.А. Бабенко на ін.) розробили перший промисловий зразок порошкового дроту марки ПП-АН1 для механізованого зварювання конструкційних і низьколегованих сталей, який не потребував додаткового захисту розплавленого металу.

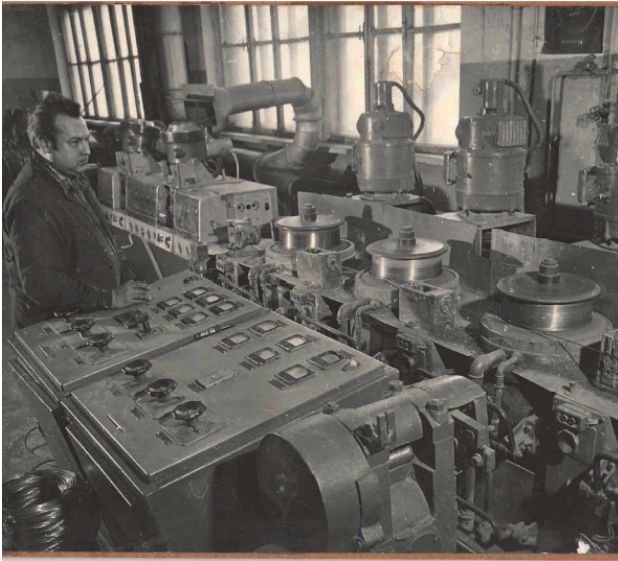
У 1962 р. лабораторія була перетворена у відділ досліджень фізико-хімічних процесів у зварювальній дузі та було створено дослідне виробництво зварювальних матеріалів, діяльність якого дозволила різко скоротити час від виникнення наукової ідеї до її широкого впровадження у практику (В.Л. Борисюк, Л.Ф. Білозеров). Для виробництва порошкових дратів у ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона був розроблений та виготовлений перший промисловий стан, продуктивність якого сягала 250 кг/год.



Напівавтоматичне наплавлення шестерні опорно-поворотного пристрою екскаватора



Автоматичне дугове наплавлення валу гідротурбини порошковим дротом



П.С. Колбушков працює на стані дослідного виробництва відділу

У 1970-1980 рр. І.К. Походня спільно з В.М. Шлепаковим, С.А. Супруном, В.М. Головком, Ю.А. Гаврилюком, Л.М. Орловим, Г.А. Шевченком, В.М. Упирем і В.М. Ігнатуком розробили низку порошкових дротів загального та спеціального призначення, у тому числі самозахисних, що характеризуються оригінальними композиціями та конструкціями оболонки, які широко застосовуються в промисловості. Створення способів зварювання порошковим дротом вимагало розробки спеціальної зварювальної апаратури, джерел живлення, а також технології зварювання. Для зварювання порошковим дротом застосовуються напівавтомати А-765, А-1197 та ін., які промисловість випускає серійно. Для автоматичного зварювання вертикальних стикових швів порошковим дротом із примусовим формуванням призначені апарати А-1381, А-1150, АД-330М, АД-333М, АД-335.

Були розроблені високопродуктивні технології та обладнання для виготовлення порошкового дро-

ту (А.М. Суптель, В.М. Шлепаков, В.Ф. Альтер, П.О. Косенко, П.І. Рак, І.П. Каплієнко), спроектовано та побудовано цехи з виробництва порошкового дроту в Україні, яке було також впроваджено в інших країнах (пріоритет захищений авторськими свідоцтвами СРСР, Болгарії, ЧССР та патентами США, ФРН, Великобританії, Франції, Італії, Австрії, Швейцарії).

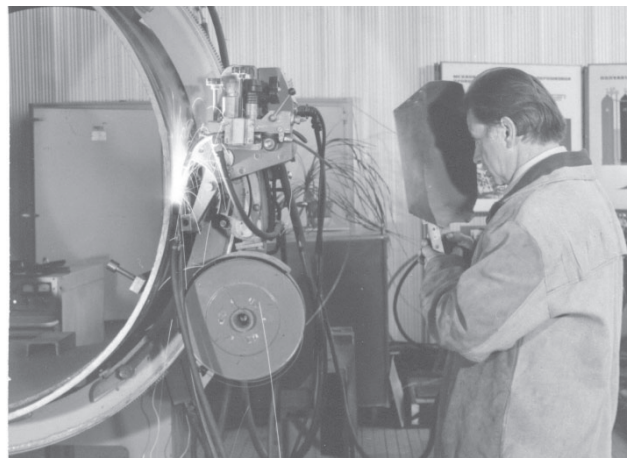
Дослідження основних закономірностей формування металу шва, легування та кристалізації зварювальної ванни за умов штучного охолодження поверхні шва та змінного положення ванни у просторі дозволили розробити нові самозахисні порошкові дроти, прогресивну технологію та обладнання для дугового зварювання неповоротних стиків труб. ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ДКТБ ІЕЗ, Каховський завод електрозварювального обладнання створили спеціалізований комплекс обладнання «Стик» для зварювання неповоротних стиків труб діаметром 1220...1420 мм (І.К. Походня, В.М. Шлепаков, В.Є. Патон, В.А. Котов, В.Я. Дубовецький). З його допомогою до 1971 р. було зварено понад 100 тис. км магістральних газо- та нафтопроводів: «Дружба», «Середня Азія–Центр», «Уренгой–Помари–Ужгород», «Хіва–Бейнеу», «Шебелинка–Ізмаїл», «Ямал–Західний кордон», «Ямал–Поволжя» та ін.

У відділі набули розвитку дослідження з управління структурою та властивостями металу зварних швів за допомогою дрібнорозмірних неметалевих включень (В.В. Головка).

Одночасно, починаючи з 1974 р., у відділі «Металургії і технології зварювання високолегованих сталей та сплавів» під керівництвом М.І. Каховського безпосередньо Г.В. Фадєєвою проводяться дослідження з розробки самозахисних порошкових дротів для зварювання високолегованих сталей. Невдовзі був створений порошковий са-



І.К. Походня, А.М. Марченко та І.Р. Явдошин у лабораторії відділу №10 ІЕЗ



Дослідження процесу зварювання неповоротних стиків трубопроводів



Зварювальний комплекс «Стик» на трасі «Уренгой-Помари-Ужгород»

мозахисний дріт марки ПП-АНВ1 для зварювання високолегованих корозійностійких сталей типу 18Х10Н, впровадження якого відбувалось на підприємствах хімічного машинобудування.

Впродовж 1975-1976 рр. В.М. Ліподаєвим була розроблена технологія та електродні матеріали для зварювання різнорідних з'єднань сталі 110Г13Л (сталь Гадфільда) із середньовуглецевими перлітними сталями типу 30Г. Ця технологія була розроблена для приварювання литих надставок (концевиків) зі сталі 110Г13Л при виготовленні рештаків вугільних конвеєрів нового типу.

Впровадження нової технології механізованого зварювання із застосуванням самозахисного порошкового дроту марки ПП-АНВ2 (В.М. Ліподаєв, Г.В. Фадеєва), що забезпечує економнолегований нікелем наплавлений метал замість ручного зварювання електродами марки НІАТ-5, дозволило отримати значний економічний ефект при виготовленні вузлів вугільних конвеєрів і стругових установок.

Виробництво порошкового дроту ПП-АНВ2 було організовано Дослідним заводом зварювальних матеріалів ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, а з 1980 р. розпочато виробництво на Артемівському машинобудівельному заводі «Победа труда» з програмою випуску 275 т/рік до 1991 р., тобто за всі роки виготовлено майже 3 тис. т порошкового дроту.

Для ширшого застосування розроблено порошковий дріт ПП-АНВ2у, що є модифікацією дроту ПП-АНВ2, який забезпечує вищі показники міцності зі збереженням на високому рівні в'язко-пластичних властивостей. Порошковий дріт ПП-АНВ2у призначений для зварювання сталі 110Г13Л, а також її різнорідних з'єднань зі сталями типу 25Г, 30Г, 35Г, сталі типу 18Х10Н зі сталями типу ВСт.3, високомарганцевистої аустенітної сталі типу 45Г17Ю3. Найширше порошковий дріт ПП-АНВ2у застосовується для зварювання ковшів кар'єрних екскаваторів типу ЭКГ-8 та їм

подібних, а також для зварювання ковшів об'ємами 10 та 20 м³. У співпраці з «УкрНДПРОЕКТ» (П.І. Кошеленко) розроблено технологію для наплавлення катків і роликів ходової частини гусеничних машин, доріжок тракового ланцюга, ланок гусениць. Так само цей дріт використовується для приварювання козирків (надставок) зі сталі 110Г13Л до черпаків драг. Порошковий дріт ПП-АНВ2у також застосовується для зварювання сталі 30ХГСА за спрощеною технологією без попереднього та супутнього підігріву.

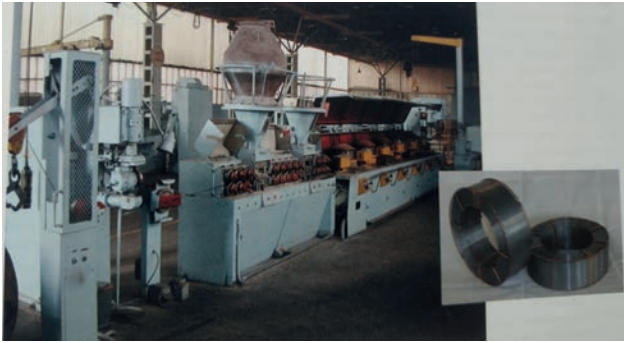
Застосування порошкових дротів ПП-АНВ2 та ПП-АНВ2у забезпечує високу економічну ефективність і підвищує якість виготовленого обладнання та його експлуатаційну надійність. Об'єми виготовлення порошкових дротів ПП-АНВ2 та ПП-АНВ2у склали 6,8 тис. т за весь період їх застосування, що свідчить про їх універсальність і високу затребуваність.

Впродовж 1985-1986 рр. було розроблено порошковий дріт ПП-АНВ5 для механізованого зварювання з примусовим формуванням металу шва високолегованих сталей аустенітного класу 08Х18Н10, 08Х20Н16АГ6. Впровадження технології зварювання порошковим дротом ПП-АНВ5 відбулося при виготовленні шарових резервуарів криогенного призначення.

Проведення досліджень (Г.В. Фадеєва, 1985-1986 рр.) з розробки складу металу стрічки, яка застосовується в якості оболонки для виготовлення порошкових дротів, дозволило створити порошкові дрони нового покоління діаметром 1,2...1,6 мм для зварювання нержавіжких сталей. Раніше, при застосуванні стрічки зі низьковуглецевих сталей марок 08Ю та 08пс в якості оболонки, необхідний хімічний склад наплавленого металу досягався виключно за рахунок легуючих елементів, що містяться в шихті порошкового дроту. Тому, зазвичай, діаметр порошкових дротів був не менш ніж



В.М. Шлепаков, Б.С. Патон і П.О. Косенко в цеху порошкових дротів Дослідного заводу зварювальних матеріалів ІЕЗ ім. Є.О. Патона



Стан для виготовлення порошкових дротів

2,2...3,2 мм у залежності від необхідного легування. При застосуванні стрічки зі сталі феритного класу майже вся кількість хрому забезпечується металом стрічки, що дозволило виготовити дроти меншого діаметру які могли застосовуватися для зварювання в усіх просторових положеннях.

Проведення досліджень впродовж 2000-2006 рр. (Г.В. Фадеева, С.О. Супрун, С.Ю. Максимов) дозволили розробити порошковий дріт діаметром 1,6 мм із застосуванням в якості оболонки стрічки зі сталі феритного класу для мокрого підводного зварювання високолегованих сталей типу 18X10H.

У 1999-2003 рр. було розроблено розрахункові методи оцінки фізичних властивостей шлаків і генерування захисних газів при нагріванні та плавленні осердя порошкових дротів. Оптимізовано системи мікролегування для зв'язування азоту в нітриди. Розроблено самозахисний порошковий дріт для зварювання конструкцій в усіх просторових положеннях, що забезпечує високі механічні властивості зварних з'єднань. (І.К. Походня).

На початку 2000-х років були розроблені порошкові дроти аустенітного класу для зварювання у вуглекислому газі броньових сталей, у тому числі для виробництва корпусів танка Т-80. Основу осердя порошкових дротів для зварювання в CO_2 становлять шлакоутворюючі матеріали, розкислювачі й легуючі елементи. Газоутворюючі матеріали, як правило, у подібні дроти не вводяться. За типом осердя порошкові дроти для зварювання у вуглекислому газі розділяють на рутілові й рутил-флюоритні.

Порошкові стрічки для наплавлення

Ще один тип порошкового електродного матеріалу, переважно для наплавлення великих поверхонь, має форму стрічки. З 1953 р. в ІЕЗ було розгорнуто науково-дослідну роботу з наплавлення зносостійких поверхонь. Ф.А. Хомусько розробив високопродуктивний спосіб автоматичного наплавлення під флюсом електродною стрічкою. Впровадження технології та матеріалів значно підвищило стійкість металургійного обладнання на заводах Дніпропетровська, Краматорська,

Магнітогорська та ін. У 1958-1960 рр. цей спосіб наплавлення було впроваджено для захисту від кавітації лопатей потужних гідротурбін, при виготовленні ободів редукторних коліс на заводах у Ленінграді, корпусів високонапірних живильних насосів, що використовувалося на Сумському заводі «Насосенергомаш».

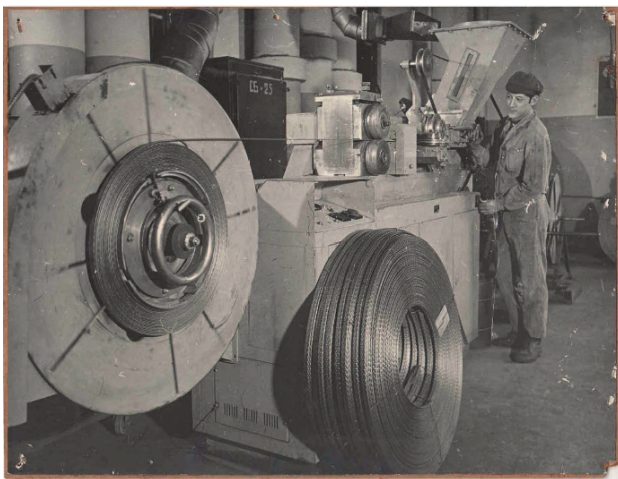
У 1981 р. в ІЕЗ було засновано відділ «Матеріалів для наплавлення та технологій наплавлення металів» під керівництвом Ю.А. Юзвенка, в якому досліджувались металургійні процеси при наплавленні порошковими дротами, визначались оптимальні системи легування для підвищення зносостійкості наплавленого матеріалу, що працює за умов абразивного та газоабразивного зношення. Було запропоновано новий тип електродного матеріалу – порошкову стрічку, розроблено конструкцію та технологію її виробництва.

Самозахисні порошкові стрічки широко застосовують для наплавлення зносостійких покриттів на поверхні деталей металургійного, енергетичного та гірничо-збагачувального виробництва (Ю.А. Юзвенко, В.П. Шимановський, І.П. Копилець, М.Г. Белоєв, О.П. Ворончук). Було розроблено порошкові стрічки для зносостійкого наплавлення гранульованих карбідів вольфраму $\text{WC}+\text{W}_2\text{C}$, які використовуються при технологічних процесах зміцнення ножів бульдозерів, валків дробильного та розмелювального обладнання, а також інших деталей і конструкцій, що працюють в умовах абразивного зношування.

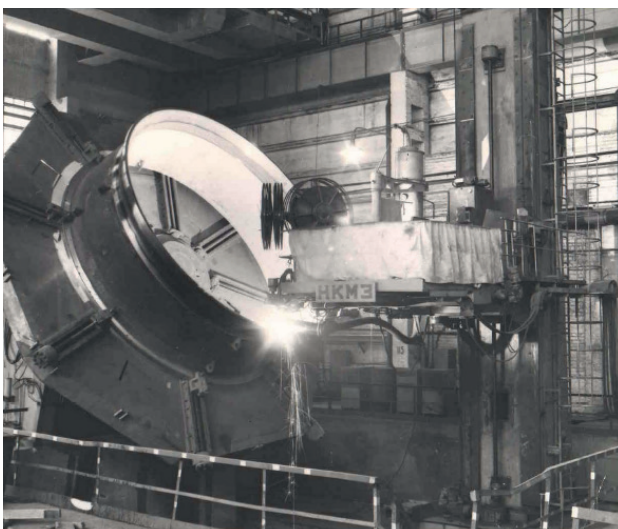
Для використання порошкових стрічок у взаємодії з ДКТБ ІЕЗ (В.Є. Патон, О.М. Мінаєв, В.Ф. Коваленко, О.О. Фомакін та ін.) були створені унікальні установки для наплавлення типу У-125, У-50, У-75.

Використання порошкових стрічок дозволило знизити частку основного металу в наплавленому до 20...25 %. Продуктивність наплавлення досягла 25 кг наплавленого металу на годину. Особливо варто зазначити порошкову стрічку ПЛ-АН 111, яка призначена для наплавлення контактних поверхонь конусів і чаш засипних апаратів доменних печей.

У 1980-х роках було розроблено композиційні сплави на базі тугоплавких з'єднань, зокрема стрічковий реліт, який використовується для зміцнення деталей бурового інструменту на долотних заводах (О.П. Жудра та ін.). Під керівництвом О.П. Жудри розроблено кілька типів стрічки на базі карбіду хрому, технологію виробництва карбіду вольфраму сферичної форми та створено спеціалізоване обладнання. Було впроваджено установки для наплавлення конусів і чаш домен-



Виготовлення порошкової стрічки



Процес наплавлення порошковою стрічкою на Новокраматорському машинобудівному заводі

них печей та наплавлення ножів гарячого різання, технологію виготовлення біметалевих плит методом наплавлення порошковою стрічкою.

Порошкові дроти для зварювання та наплавлення міді та мідних сплавів

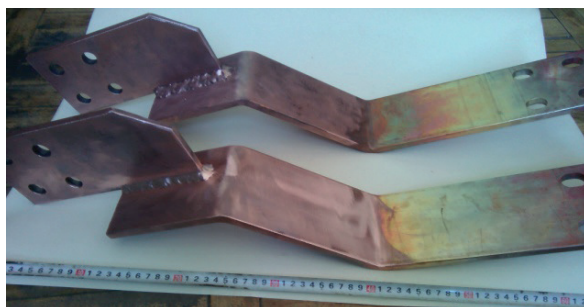
Систематичні дослідження зі створення та вдосконалення технологічних процесів зварювання та наплавлення міді та її сплавів і, насамперед, розробки високоефективних зварювальних і наплавлювальних матеріалів розпочато в ІЕЗ ще в 50-60-х роках минулого сторіччя (В.В. Підгаєцький). Найрезультативнішими виявилися дослідження, виконані у 70-80-х роках, коли у структурі нового відділу фізико-металургійних процесів зварювання тугоплавких і хімічно активних кольорових металів (С.М. Гуревич) було організовано групу, а потім і лабораторію зварювання та наплавлення міді та її сплавів (під керівництвом В.М. Ілюшенка).

У цей період розроблено ряд марок порошкових дротів для зварювання та наплавлення олов'яно-свинцевих, олов'яно-цинково-свинцевих бронз

(С.І. Опанасенко). Також розроблено зварювальний порошковий дріт марки ПД-БрХТ12-2, призначений для плазмово-дугового зварювання міді та хромової бронзи завтовшки >15 мм (А.Ф. Костюк, В.Є. Седов). За рахунок спільного легування швів хромом і титаном покращуються механічні властивості металу, особливо при високих температурах, і підвищується стійкість металу швів проти утворення пор.

Для ПІГ-зварювання міді розроблено порошковий дріт марки ПД-АНМ1 (А.Ф. Костюк, В.Є. Седов, В.О. Аношин). Введення до складу осердя порошкового дроту невеликих добавок ефективних розкислювачів забезпечує необхідну якість і теплофізичні властивості зварних швів при гелієво-дуговому зварюванні товстостінних елементів різних електротехнічних виробів (двигуни, шинопроводи та ін.).

Розвиваючи дослідження в області наплавлення антифрикційних мідних сплавів, в ІЕЗ, починаючи з 2000-х років, розроблено ряд марок по-



Застосування порошкового дроту ПД-АНМ1 при зварюванні струмопідводів і відновленні фурми, виготовлених із міді



Біметалева втулка сталь+складнолегована алюмінієва бронза після наплавлення та механічної обробки

рошкових дротів, які дозволяють отримати склад наплавленого металу, що відповідає маркам складнолегованих алюмінієвих бронз з високими антифрикційними властивостями наплавленого металу (А.М. Бондаренко).

В останні роки створено порошкові дроти для зварювання та наплавлення як під флюсом, так і для ТIG-зварювання високоалюмінієвих бронз і бронз художнього призначення. Розроблені дроти та технології механізованого наплавлення успішно впроваджені у виробництво при виготовленні біметалічних втулок, під'ятників та інших вузлів тертя високонавантажених механізмів (гірничо-збагачувальне обладнання, відповідальна арматура, підшипникові втулки електромоторів та ін.).

Порошкові дроти для зварювання під водою

У 1966 р. в ІЕЗ створено лабораторію підводного зварювання. В ній було розроблено наукові засади механізованого зварювання та різання безпосередньо у воді, досліджено особливості горіння дуги при високому гідростатичному тиску та умови забезпечення її стійкості на різних глибинах, поведіння розплавленого металу в цих екстремальних умовах і механізм формування швів, взаємодія металу з газами, вплив хімічного складу та водного середовища на властивості з'єднань (І.М. Савич, А.А. Ігнатушенко, В.Я. Кононенко).

В ІЕЗ було розроблено склад шихти порошкового дроту та технологію її виготовлення, що забезпечила герметичність дроту. Це дозволило розмістити порошковий дріт у занурювальному вузлі напівавтомата, заповненого водою, що спростило його конструкцію. Відпала потреба у подачі газу в занурювальний вузол. Дріт рутил-руднокислого виду, який отримав назву ППС-АН1, забезпечував зварювання в прісній воді на глибині до 20 м низьковуглецевих і низьколегованих сталей. Технологія мокрого механізованого зварювання під водою самозахисними

порошковими дротами, на момент своєї розробки, була унікальною та не мала аналогів у світі.

Для можливості зварювання порошковим дротом під водою конструкторами ДКТБ ІЕЗ (В.Є. Патон, В.Б. Смолярко, В.Г. Пічак) були розроблені спеціальні напівавтомати.

Маса занурювального вузла першого напівавтомата проекту А1450 «Нептун 4» із запасом порошкового дроту становила близько 46 кг. В останніх проектах (ПШ141, ПШ146) масу апарату із запасом порошкового дроту вдалося знизити до 7 кг, була забезпечена рівномірна подача електродного дроту незалежно від навантаження при довжині кабелю ланцюга управління до 675 м.

При дослідженні порошкових дротів для механізованого зварювання під водою було встановлено, що низка компонентів, що вводяться в шихту, сприяють збільшенню глибини проплавлення металу. На базі досліджень було розроблено технологічний процес та порошкові дроти для механізованого підводного різання сталей, чавуну та кольорових металів (І.М. Савич, М.С. Данченко, Ю.М. Нефьодов). Механізація зварювальних робіт за рахунок засто-



Процес зварювання порошковим дротом під водою



Устаткування для підводного зварювання та різання

сування напівавтоматів і порошкових дротів була розширена й на зварювання під водою.

Розв'язання цього завдання завершилося створенням кількох конструкцій напівавтоматів; найуспішнішими з яких були А1450, А1660. Процес роздільного дугового різання порошковими дротами можна виконувати на глибині понад 600 м. Наприклад, у 2000 р. унікальні розробки механізованого різання були успішно застосовані під час підйому підводного човна (І.М. Савич, М.Є. Данченко).

У подальшому під керівництвом С.Ю. Максимова продовжувались теоретичні й технологічні дослідження ручного та механізованого зварювання під водою. Були з'ясовані фізико-металургійні особливості взаємодії розплавленого металу з газами в атмосфері парогазового мішура, причини виникнення та заходи захисту від утворення пор в металі шва, механізм окрихчування наплавленого металу при зварюванні безпосередньо у водному середовищі та металургійні рішення стосовно забезпечення необхідного рівня пластичності металу шва, умови формування швів у всіх просторових положеннях, вплив водного середовища на процес зварювання та умови стабілізації дуги при підвищеному гідростатичному тиску, розробка електродних матеріалів, технологій та обладнання для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей під водою.

Запропоновано конструктивні рішення зварних з'єднань при ремонті підводних трубопроводів, суден на плаву та інших підводних конструкцій відповідального призначення.

Робота ІЕЗ була впроваджена при відновленні переходів газо- та нафтопроводів через річки, ремонті корпусів кораблів, що отримали аварійні та навігаційні пошкодження, причальних споруд і стаціонарних основ видобувних морських платформ.

Таким чином, розроблені в ІЕЗ самозахисні порошкові дроти спеціального призначення: для виконання вертикальних і горизонтальних швів, із примусовим формуванням, для зварювання під водою, наплавлення й т.д. дозволяють вирішити проблему механізації зварювальних процесів на

монтажі, у польових умовах, у відкритих цехах підприємств. Продуктивність зварювання порошковим дротом у порівнянні з ручним дуговим зварюванням вища в 3–5 разів.

Тільки протягом 1964–1977 рр. в Україні виготовлено близько 100 тис. т зварювального порошкового дроту. Зацікавлення за кордоном викликали оригінальні високопродуктивні стани для виготовлення порошкового дроту. Приоритет ІЕЗ на ці стани захищений авторськими свідоцтвами СРСР та патентами Англії, Австрії, Італії, США, Франції, Швейцарії, Угорщини, НДР, Чехословаччини та ін. Виготовлені в СРСР технологічні лінії для виробництва порошкового дроту, що включають високопродуктивні волочильні стани, агрегати для профілювання стрічки та дозування порошкоподібних шихт, поставлені фірмам США, Франції, ФРН, Болгарії, Угорщини, Чехословаччини та Китаю. Порошкові дроти, розроблені в ІЕЗ, і устаткування для їхнього виробництва поставлялись до багатьох країн. За ліцензіями ІЕЗ виробництво порошкових дротів було організовано фірмами США, Франції, ФРН та на заводах Болгарії, Угорщини, Чехословаччини.

Список літератури

1. Фрумин І.І. (1961) *Автоматическая электродуговая наплавка*. Харьков: Металлургиздат.
2. Савич І.М. (1969) Подводная сварка порошковой проволокой. *Автоматическая сварка*, **10**, 70–74.
3. Походня І.К., Суптель М.А., Шлепаков В.Н. (1972) *Сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка.
4. Походня І.К., Альтер В.Ф., Шлепаков В.Н. і др. (1980) *Производство порошковой проволоки. Учеб. пособие для вузов*. Киев, Вища школа.
5. Походня І.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. і др. (1980) *Порошковые проволоки для дуговой сварки. Каталог-справочник*. Киев, Наукова думка.
6. Патон Б.Е., Савич І.М. (1987) К 100-летию сварки под водой. *Автоматическая сварка*, **12**, 1–2.
7. Данченко М.Е., Савич І.М., Нефедов Ю.Н. (1988) Подводная дуговая резка порошковой проволокой. *Автоматическая сварка*, **4**, 59–61.
8. Походня І.К. (1998) *Металлургия сварки, состояние и проблемы. Сварка и родственные технологии в XXI веке*. Киев, ІЭС ім. Е.О. Патона.
9. Савич І.М., Максимов С.Ю. (2001) Применение механизированной резки при подъеме подводной лодки. *Автоматическая сварка*, **2**, 59–60.
10. Савич І.М., Захаров С.М., Зайцева Н.В., Козлов Е.В., Максимов С.Ю. (2003) Структура и свойства металла, наплавленного под водой порошковой проволокой с никелевой оболочкой. *Автоматическая сварка*, **4**, 19–22.
11. Грецкий Ю.Я., Максимов С.Ю. и др. (2004) Повышение устойчивости дуги, горящей в воде, при сварке порошковой проволокой. *Автоматическая сварка*, **2**, 11–15.
12. (2006) *Самозащитный порошковый дрит для подводного зварювання високолегованих сталей типу 12Х18Н10Т*. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ.
13. Рябцев І.А., Сенченков І.К., Турык Э.В. (2015) *Наплавка. Материаль, технологии, математическое моделирование*. Гливице, Изд-во Силезского политехнического института.

д.і.н. Олександр Корнієнко

РОЗРОБКИ АСОЦІАЦІЇ «ОКО» ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЙОК

Асоціація «ОКО», до якої входять «Ультракон-Сервіс», «Промприлад» та УкрНДІНК – багаторічний лідер в Україні серед виробників засобів неруйнівного контролю металопродукції та постійний учасник міжнародних виставок.

Науково-виробничі підприємства, які займаються неруйнівним контролем рейок при їх експлуатації, постійно покращують як методи контролю, так і технологію аналізу результатів контролю для забезпечення своєчасного виявлення не тільки критичних дефектів, а й дефектів, що почали свій розвиток. Саме з цією метою НВФ «Ультракон-Сервіс» розробила серію приладів для ультразвукового та вихрострумowego контролю:

- двонитковий рейковий ультразвуковий дефектоскоп УДС2-73;
- одонитковий рейковий ультразвуковий дефектоскоп УДС2-77;
- ручний портативний ультразвуковий дефектоскоп Sonoson B;
- одонитковий рейковий вихрострумовой дефектоскоп ВТС2-77.

Залізничні рейки контролюються за допомогою ультразвукових хвиль високої частоти, зазвичай від 2 до 5 МГц. Оскільки дефекти в рейках мають різний характер, використовують різні кути введення ультразвуку в рейку та різні схеми введення звукових хвиль, наприклад: луна-метод, дзеркально-тіньовий метод, тандем-методи. Також для ефективного та оперативного виявлення дефектів реалізують різні види виведення даних на екран, наприклад: А-скан, Б-скан та їх комбінації. Така різноманітність методів контролю та схем введення звукових хвиль, а також різні види візуалізації

даних дозволяють ефективно та з великою ймовірністю виявляти дефекти на різних стадіях розвитку.

Вихрострумовой контроль дозволяє виявляти експлуатаційні тріщини поверхні катання рейки.

При ручному контролі рейок використовуються ультразвуковий або вихрострумовой дефектоскопи, набір перетворювачів і спеціальний скануючий пристрій.

При механізованому контролі рейок використовуються знімні візки, які приводяться в рух операторами. НВФ «Ультракон-Сервіс» пропонує три типи таких пристроїв: ультразвуковий одонитковий візок, ультразвуковий двонитковий візок та вихрострумовой одонитковий візок. На таких візках розміщується електронне обладнання, блоки перетворювачів та блоки живлення.

Механізовані ультразвукові дефектоскопи дозволяють проводити суцільний контроль рейок зі швидкістю до 4 км/год на наявність дефектів в обох нитках залізничної колії по всій довжині та перерізу рейки, за винятком підшви.

Механізовані вихрострумовой дефектоскопи дозволяють проводити контроль рейок зі швидкістю до 2,5 м/с на наявність дефектів однієї нитки залізничної колії, як у головці так і у поверхні катання рейки.

Швидкісний безперервний контроль рейок за допомогою мобільних засобів полягає в тому, що контроль рейок проводиться за допомогою високошвидкісних транспортних систем (автомобіль, вагон або мототриса) без зупинки за призначеним маршрутом. Це дозволяє контролювати ділянки, що перевищують 100 км за зміну. Дані контролю аналізуються, виділяються потенційно небезпечні ділянки рейок, які перевіряються операторами за допомогою ручних або механізованих дефектоскопів.

За матеріалами сайту www.ndt.com.ua





Ефективне навчання та підготовка робітничих кадрів з професії «Електрогазозварник»

Навчання зварюванню без зайвих зусиль

Враховуючи одну зі світових тенденцій браку кваліфікованих кадрів для зварювальних виробництв, компанія Fronius International активно розвиває напрямок Welducation: навчання та підготовка зварників.

У цьому напрямку наразі ми пропонуємо декілька типів продуктів, щоби максимально задовольнити потреби в швидкому та ефективному процесі підготовки кваліфікованих спеціалістів у галузі зварювання.

Окрім самих зварювальних апаратів, важливою інноваційною складовою процесу навчання є мобільні додатки та новий тренажер віртуального зварювання.

Мобільні програми для зварників. Цифрові та мережеві технології відіграють дедалі важливішу роль, зокрема у галузі зварювання. Мобільні програми Fronius не лише дають змогу обчислювати параметри зварювання, а й забезпечують підтримку професіоналам і початківцям на всіх етапах навчання.

Welducation Basic. Безкоштовна програма для смартфона або планшета надає відомості про всі аспекти зварювання.



<https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnohiiyi/innovatsiyini-rishennya/navchannya-zvaryvalnykiv/welducation-basic-app>

Вікторина забезпечує опанування теоретичних принципів, а заняття в ігровій формі – набуття практичних навичок. Власні успіхи з інтерактивного навчання можна порівняти з результатами інших користувачів програми, що відображаються в міжнародному рейтингу. Це допомагає підвищити свій рівень.



WeldConnect. <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnohiiyi/innovatsiyini-rishennya/weldconnect>

Завдяки програмі **WeldConnect** зварник може швидко та без проблем підібрати належні параметри для завдань ручного зварювання. На кожному етапі програма запитує точні дані щодо поточної області застосування, зокрема процесу зварювання, основного матеріалу, виду шва та захисного газу. Користувач може ввести такі дані вручну або відсканувати QR-коди відповідних матеріалів. За допомогою цієї інформації майстер визначає іде-

альні параметри для зварювання для TIG та MIG/MAG та використовує дані для розрахунків.



Тренажер віртуального зварювання Welducation Simulator. Зварювання без ризиків: віртуальне навчання пропонує безпечний, доступний та економний спосіб реалістичного моделювання складних процесів зварювання. Новачки можуть повторювати завдання стільки разів, скільки потрібно, удосконалювати свої навички в безпечному середовищі та вчитися на своїх помилках. Це ідеальний спосіб підготувати учнів до реальних ситуацій та навчити швидко й ефективно реагувати на постійно змінювані вимоги на ринку праці та в галузі.

Поєднуючи заняття на освітній платформі **Welducation Campus** із використанням тренажера **Welducation Simulator**, учні й тренери отримають повний план навчання, який містить теоретичні матеріали та блоки віртуальних занять із тренажером.

Оновлений тренажер **Welducation Simulator** дає можливість проводити навчання й тренування зварників, а також крок за кроком відпрацьовувати навички зварювання в реалістичних умовах – і все це без жодних ризиків, у цілковитій безпеці та без додаткових витрат на матеріали, гази чи деталі, що зношуються. Завдяки новим окулярам доповненої реальності всі зварні шви, процеси зварювання й практичні завдання загалом видаються напрочуд реалістичними. Водночас можна ознайомитись із теоретичними аспектами зварювання, скориставшись освітньою платформою **Welducation Campus**, яка бездоганно доповнює наш навчальний комплект.

Високотехнологічне навчання для боротьби з викликами майбутнього. У своєму новітньому тренажері зварювання компанія Fronius уперше поєднала технології віртуальної та доповненої реальності.

До того ж, у цьому контексті часто використовується й концепція розширеної реальності. Основний принцип цієї технології полягає в додаванні цифрових елементів у реальне середовище – чи то на екрані, чи то в окулярах – безпосередньо в полі зору учня. Застосування технології доповненої реальності та використання оригінальних зварювальних пальників, шлангових пакетів і корпусів справжніх зварювальних систем Fronius допомагають максимально реалістично відтворити процес зварювання. Учні можуть використовувати тренажер, щоб відпрацювати всі три типи процесів: ручне електродове зварювання, MIG/MAG і TIG. Вони вдосконалюють навички на різних матеріалах (сталь, нержавка сталь, алюміній), що мають різну товщину, та практикують різні положення зварювання.

Використання стандартних деталей і можливість регулювання параметрів зварювання допомагають якомога реалістичніше відтворити умови роботи, адже суть навчання полягає не лише у створенні бездоганих швів: спеціалісту також необхідно виконати низку дій до та після з'єднання елементів, а також між сеансами зварювання, як це було б під час справжньої роботи. Це передбачає, зокрема, підключення зворотного кабелю та налаштування правильних параметрів зварювання. На планшеті із тренажером відображається стандартний інтерфейс зварювальної системи Fronius, щоб учасники занять змогли ознайомитися з особливостями використання реальних апаратів.

Практика веде до досконалості. Віртуальне навчання пропонує три рівні складності: легкий, середній і високий. Так, наприклад, новачкам без початкових знань постійно надаватимуться поради, тоді як досвідченим спеціалістам доведеться формувати зварний шов без візуальних підказок щодо відстані, кута нахилу зварювального пальника або швидкості зварювання. Крім того, широкий набір аналітичних функцій допомагає учням вдосконалювати техніку виконання та виявляти помилки. Дані про всі зварні шви можна записати й переглянути в будь-який момент.

Теоретичні матеріали на платформі Welducation Campus. Поєднання тренажера й інтегрованої платформи *Welducation Campus* дає змогу створити повноцінну навчальну систему, яка надає доступ до теоретичних матеріалів і блоку практич-

них завдань. Учні отримують знання та навички самостійно, проходячи підготовчі курси й не потребуючи постійного нагляду з боку інструкторів. Система стежить за результатами та процесом навчання, водночас пропонує й опцію персоналізованого тренування, щоби за необхідності інструктори могли завантажувати на платформу *Campus* власні теоретичні матеріали. Заохочуючи один одного та отримуючи оцінки й відгуки професіоналів, спеціалісти навчаються швидко та ефективно. Продумана система оцінювання уможливілює об'єктивне й чесне оцінювання результатів, а рейтинг за успіхами стимулює учнів повністю розкрити свій зварювальний потенціал.



Приголомлива реалістичність: використання технології доповненої реальності, оригінальних зварювальних пальників і корпусу справжньої зварювальної системи допомагає максимально правдоподібно відтворити умови зварювання



Досконале поєднання теорії та практики: дидактична методика дає учням змогу поглиблювати свої знання, водночас розвиваючи практичні навички

Детальніша інформація стосовно навчання зварників:

<https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnologiyi/innovatsiyi-rishennya/navchannya-zvaryvalnykhiv>



Директор з маркетингу ТОВ «Фроніус Україна»
Віталій Бондаренко