

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 2 0 2 2 С В А Р Ю В А Н Н Я

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

МЕТАЛУРГІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Харламов М.Ю., Yao Yuhui, Дем'янов О.І., Строгонов Д.В., Щерецький В.О. Вплив супутнього обтискаючого потоку повітря на структуру і властивості покриття при плазмово-дуговому напильованні плавким струмопровідним дротом.....3
Ворончук О.П., Жудра О.П., Кайда Т.В., Кочура В.О., Капітанчук Л.М., Еремєєва Л.М. Вплив складу компонентів шихти порошкових стрічок системи легування С-Fe-Cr-Mo на хімічну та структурну неоднорідність наплавленого металу 11

3D-ДРУК

Матвійчук В.А., Нестеренков В.М., Берднікова О.М. Адитивна електронно-променева технологія виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів.....16

МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ

Ющенко К.А., Задерій Б.О., Гак І.С., Звягінцева Г.В., Алексієнко Т.О. Руйнування зварних з'єднань монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів при випробуванні на розрив.....26

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Борисов Ю.С., Вігільянська Н.В., Дем'янов І.А., Мурашов А.П., Грищенко О.П. Дослідження покриттів, отриманих високошвидкісним газополуменевим напыленням керметного порошку на основі сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується33

ЕЛЕКТРОШЛАКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Нетьяга А.В., Кусков Ю.М., Проскудін В.Н., Жданов В.А. Вибір зносостійких матеріалів для електрошлакового напильовання у струмопідвідному кристалізаторі деталей обладнання гірничої техніки.....37

КОНТАКТНЕ ЗВАРЮВАННЯ

Ланкін Ю.М., Семікін В.Ф., Романова І.Ю., Байштрук Є.М., Осечков П.П., Крикуненко І.В. Мікроконтролерний регулятор струму контактної зварювання41

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

Малишева Д.І., Виноградов Н.А., Сисоєв В.Ю. Конструктивні особливості мобільних рейкозварювальних машин для контактної стикової зварювання45

АТЕСТАЦІЯ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ

Косторной О.С., Лактіонов М.О. Досвід атестації технології зварювання52

ІНФОРМАЦІЯ

Конференція з електрозварювання в хірургії56
Відкриття пам'ятника академіку Б.Є. Патону на Байковому кладовищі56
Експериментальні роботи НТЦ «Промавтосварка» у галузі металізації57
Календар лютого61

CONTENT

METALLURGY AND TECHNOLOGY OF WELDING AND SURFACING

Korzhik V.M., Khaskin V.Yu., Kharlamov M.Yu., Yao Yuhui, Demianov O.I., Stroganov D.V., Shcheretskiy V.O. Influence of accompanying compressing air flow on the coating structure and properties in plasma-arc spraying by consumable current-conducting wire.....3
Voronychuk O.P., Zhudra O.P., Kaida T.V., Kochura V.O., Kapitanchuk L.M., Eremjeva L.M. Influence of the composition of charge components in flux-cored strips of C-Fe-Cr-Mo alloying system on chemical and structural heterogeneity of the deposited metal 11

3D PRINTING

Matviichuk V.A., Nesterenkov V.M., Berdnikova O.M. Additive electron beam technology of manufacture of metal products from powder materials.....16

FRACTURE MECHANICS

Yushchenko K.A., Zaderyi B.O., Gakh I.S., Zviagintseva G.V., Aleksijenko T.O. Destruction of welded joints of single-crystal high-temperature nickel alloys26

PROTECTIVE COATINGS

Borison Yu.S., Vihilianska N.V., Demianov I.A., Murashov A.P., Grishchenko O.P. Studies of coatings produced by high-velocity oxyfuel spraying using cermet powder based on FeMoNiCrB amorphizing alloy.....33

ELECTROSLAG TECHNOLOGIES

Netyaga A.V., Kuskov Yu.M., Proskudin V.M., Zhdanov V.O. Selection of wear-resistant materials for electroslag surfacing of mining equipment parts in a current-conducting mould37

FLASH-BUTT WELDING

Lankin Yu.M., Semikin W.F., Romanova I.Yu., Bayshtuk E.M., Osechkov P.P., Krykunenko I.V. Microcontroller regulator of flash butt welding current.....41

WELDING EQUIPMENT

Malysheva D.I., Vinogradov N.A., Sysoev V.Y. Design features of mobile railway welding machines for flash butt welding45

QUALIFICATION AND CERTIFICATION

Kostomaj O.S., Laktionov M.O. Experience of welding procedure qualification52

INFORMATIONS

Conference on electric welding in surgery.....56
Opening of the monument to academician B.E. Paton at Baikov Cemetery56
Experimental work of STC «Promavtosvarka» in the field of metallization.....57
February calendar61



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
І.В. Кривцун (головний редактор),
В.М. Ліподаєв (штатний заст. гол. ред.)
О.М. Берднікова, Ю.С. Борисов,
В.В. Книш, В.М. Коржик,
Ю.М. Ланкін, Л.М. Лобанов,
С.Ю. Максимов, М.О. Пашчин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,
К.А. Юшенко;
В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;
В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;
М.М. Студент, Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів;
М. Зініград, Аріельський університет, Ізраїль;
У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,
Аахен, Німеччина;
Я. Пілярчик, Інститут зварювання, Глівіце, Польща

Засновники

Національна академія наук України,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 2302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
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, 151
Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

Передплата 2022

Передплатний індекс 70031.

12 випусків на рік (видається щомісячно).

Друкована версія: 2880 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

Електронна версія: 2880 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.

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается

англійською мовою під назвою

«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU:

I.V. Krivtsun (Editor-in-Chief),
V.M. Lipodaev (Staff Deputy Editor-in-Chief)
O.M. Berdnikova, Yu.S. Borisov,
V.V. Knysh, V.M. Korzhik,
Yu.M. Lankin, L.M. Lobanov,
S.Yu. Maksimov, M.O. Pashchin,
V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev,
K.A. Yushchenko;
V.V. Dmitrik, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv;
V.V. Kvasnytskyi, E.P. Chvertko, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;
M.M. Student, Karpenko Physico-Mechanical Institute
of NASU, Lviv;
M. Zinigrad, Ariel University, Israel;
U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany;
Ja. Pilarczyk, Welding Institute, Gliwice, Poland

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
International Association «Welding» (Publisher)

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150,
11 Kazymyr Malevych Str.
Tel.: (38044) 200 2302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
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, 151.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration

of KV 4788 dated 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Subscription 2022

Subscription index 70031.

12 issues per year (issued monthly), back issues available.

\$216, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$144, 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.

«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)
journal is republished in English under
the title «The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

The editorial board is not responsible
for the content of the promotional material.

ВПЛИВ СУПУТНЬОГО ОБТИСКАЮЧОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТЯ ПРИ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОМУ НАПИЛЮВАННІ ПЛАВКИМ СТРУМОПРОВІДНИМ ДРОТОМ

В.М. Коржик¹, В.Ю. Хаскін¹, М.Ю. Харламов¹, Yao Yuhui², О.І. Дем'янов¹, Д.В. Строгонов¹,
В.О. Щерецький¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Shenzhen Hanzhizi Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Road, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, (China), E-mail: 514929948@qq.com

Стаття присвячена дослідженням технологічних особливостей плазово-дугового напилювання плавким струмопровідним дротом-анодом. Актуальність застосування такого процесу пов'язана з можливістю напилювання безпосередньо розпилюванням дротів без необхідності виготовлення з них порошкових матеріалів. Було проведено експериментальну перевірку результатів математичного прогнозування впливу кільцевого захисного потоку стисненого повітря, супутнього запиленому плазовому струменю, на результати плазово-дугового напилювання компактних дротів-анодів. Встановлено ключову роль збільшення витрат цього потоку понад 20 м³/год у покращенні формування та якості покриттів, що напилюють. При напиленні покриттів з компактних дротів поруватість знижувалася із підвищенням значень витрат супутнього повітряного потоку G_2 і досягненням значень цього параметра в межах 0,5...2,5 %. Проведені експерименти дозволили отримати безпоруваті покриття при напилюванні дротів з міді М2, ніхрому Х20Н80, нікелю НП1, алюміній-магнієвого сплаву АМг63. Дослідження результатів цих експериментів показали, що при збільшенні значень витрат супутнього захисного повітряного потоку G_2 від 0 до 40 м³/год вигорання легуючих елементів (С, Мп) в процесі напилювання із сталених дротів марок 65Г і 70 зменшується в середньому на 30...40 %. Збільшення параметра витрат G_2 повітряного потоку, супутнього запиленому плазовому струменю, впливає на підвищення міцності зчеплення і зносостійкості покриттів. Так, при $G_2 = 20...40$ м³/год міцність зчеплення при відриві покриттів зі сталі 70 по нормалі досягає до 60...70 МПа, а покриттів з міді М2 – 40...55 МПа. Зносостійкість покриттів в умовах граничного тертя та стійкості при кавітаційному зношуванні при збільшенні G_2 від 0 до 40 м³/год підвищується, що проявляється у зменшенні такого зношування з 1,35 до 0,32 мг/хв. Бібліогр. 13, рис. 9.

Ключові слова: плазово-дугове напилювання, компактні дроти-анооди, супутній потік, коефіцієнт використання матеріалу, міцність зчеплення покриття, зносостійкість

Вступ. На сьогоднішній день існує певна кількість перспективних промислових технологій нанесення функціональних покриттів [1]. У тому числі застосовують такі, що дозволяють розпилювати металеві компактні та порошкові дроти плазово-дуговим способом. При застосуванні такого процесу відбувається дугове плавлення дроту з утворенням крапель рідкого металу в атмосфері аргону [2]. Для плазово-дугового напилення плавкими дротами аргоніву дугу, яка горить між вольфрамовим катодом і дротом, обдувають інтенсивним супутнім повітряним потоком. Потік аргону, що обдуває дугу, подається крізь плазмотворююче сопло з невеликими витратами. У проміжок між плазмотворюючим і захисним соплами подається повітря із значними витратами [3]. Особливостями такого процесу є те, що плавлення і розпилення матеріалу дроту відбувається в захисній атмосфері аргону, а дроблення розплаву і розгін дисперсних частинок – у плазовому струмені, обтиснутому супутнім по-

током повітря, що витікає з кільцевого зазору між соплами плазмотрона. В результаті забезпечуються мінімальні втрати на випаровування матеріалу дроту і оптимальний фракційний склад розпиленої дисперсної фази, досягнення частинками напилюваного матеріалу навколосвукової швидкості в момент зустрічі з основою, висока об'ємна концентрація напилюваних частинок і мінімальний кут розкриття запиленого плазового потоку [4]. Проте виникає загроза насичення розплавленого матеріалу дроту киснем і азотом повітря через введення його у зону дії електричної дуги, яке може викликати збурення захисного потоку повітря і проникнення повітря у високотемпературну дугу. Також на розплавлені краплі металу впливають умови захисту запиленого струменю плазми на робочій відстані між плазмотроном і поверхнею, що напилюють [5]. Внаслідок цього хімічний склад осаджуваного покриття може значно відрізнитися від складу дроту, що подається в дугу. Для усунення

Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Хаскін В.Ю. – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Щерецький В.О. – <https://orcid.org/0000-0002-8561-4444>, Харламов М.Ю. – <https://orcid.org/0000-0003-3755-814X>, Дем'янов О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-7184-3839>, Строгонов – Д.В. <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>
© В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, В.О. Щерецький, М.Ю. Харламов, О.І. Дем'янов, Д.В. Строгонов, 2022

цього явища необхідно створити надійний захист не лише зони плавлення дроту, а й всього запиленого струменю плазми. Розв'язання цієї проблеми, а також покращення експлуатаційних характеристик покриттів, що наносяться описаним способом, і міцності їх зчеплення з основою, є актуальним завданням.

Мета роботи – дослідити вплив супутнього запиленому плазмовому струменю потоку захисного газу на процес плазово-дугового напильовання плавким дротом-анодом і на експлуатаційні характеристики покриттів, що наносяться за допомогою цього процесу.

Теоретичний аналіз впливу супутнього потоку на характеристики плазового потоку. Для досягнення поставленої мети розв'язувалися наступні завдання: аналіз розрахункового моделювання процесу і впливу на його характеристики величини витрат супутнього газового потоку, експериментальні дослідження впливу супутнього потоку захисного газу на коефіцієнт використання матеріалу, а також на такі експлуатаційні характеристики покриття, як пористість, міцність зчеплення з основою, зносостійкість.

Згідно технологічної схеми процесу плазово-дугового напильовання дротом-анодом тугоплавкий катод утворює разом зі стінкою каналу кільцеве електродне сопло радіусу R_c (рис. 1), через яке подається плазмоутворюючий газ з витратою G_1 і протікає весь струм дуги I . За початок розрахункової ділянки приймали площину $z = 0$, вважаючи, що вона знаходиться на деякій відстані від робочого торця катода. Це дозволило на першому етапі виключити з розгляду прикатодні процеси та вважати потік дугової плазми в цій площині вісесиметричним і одновимірним у напрямку осі OZ , тим самим, коректно задати вхід-

ні граничні умови. Вважається, що захисний газ з витратою G_2 подається через кільцевий канал $R_1 \dots R_2$ вісесиметричним потоком під кутом α до вісі симетрії системи. Анодний дріт розташований на відстані Z_2 від початку розрахункової області. Припускається, що в області анодної прив'язки струм дуги плавно зменшується і далі (при $z > Z_2$) відбувається безструмовий інерційний рух газу.

При теоретичному аналізі процесів нагрівання та руху газу при плазово-дуговому розпиленні дроту-анода розрахункову ділянку можна умовно розділити на три області (рис. 1): 1 – область течії дугової плазми всередині сопла плазмотрону ($0 \leq z < Z_1$); 2 – область зовнішньої течії дугової плазми її взаємодії з потоком захисного газу ($Z_1 \leq z \leq Z_2$); 3 – область інерційного руху без струмової плазми ($z > Z_2$).

Для математичного опису процесів, які протікають при формуванні і витіканні плазового струменя з сопла плазмотрону, приймали такі припущення:

- плазова система, що розглядається, має циліндричну симетрію, а процеси, які відбуваються, вважаються стаціонарними;
- захисний газ подається вісесиметричним потоком через кільцевий канал;
- течія захисного газу в каналі вважається ламінарною і описується модельними залежностями;
- плазма знаходиться в стані локальної термодинамічної рівноваги, власне випромінювання плазми – об'ємне;
- основним механізмом нагрівання плазми є джоулеві тепловиділення (роботою сил тиску і в'язкою дисипацією можна знехтувати), а перенесення енергії в стовпі відбувається за рахунок те-

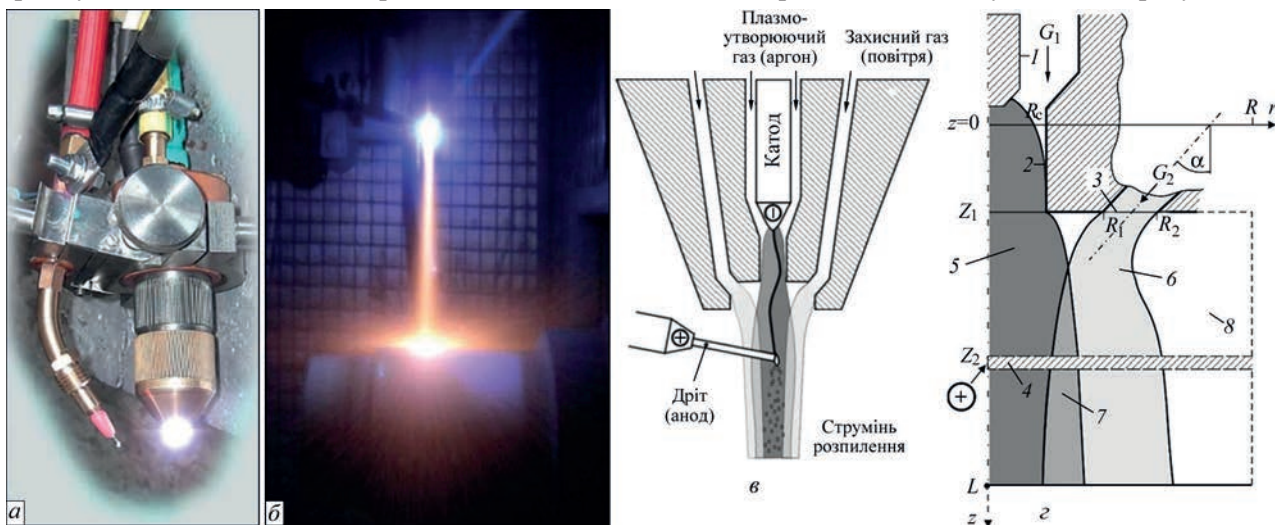


Рис. 1. Зовнішній вигляд плазмотрону (а), візуалізація (б) і технологічна схема процесу (в) та схема розрахункової математичної моделі нагрівання та руху газу при плазово-дуговому напильованні покриттів струмопровідним дротом-анодом: 1 – катод; 2 – сопло; 3 – канал подачі газу обдування; 4 – дріт-анод; 5 – дугова плазма; 6 – газ обдування (супутній газовий потік); 7 – зона змішування; 8 – зовнішнє газове середовище

плопровідності та конвекції (природна конвекція в рахунок не приймається);

– течія плазми в'язка, дозвукова, режим течії турбулентний;

– зовнішні магнітні поля відсутні.

При побудові фізико-математичної моделі вважали, що тугоплавкий катод утворює разом зі стінкою каналу кільцеве електродне сопло радіусу R_c (рис. 1), через яке подається плазмоутворюючий газ з витратою $G_1 = 2\pi \int_0^{R_c} \rho u r dr$ і протікає

весь струм дуги $I = 2\pi E \int_0^{R_c(z)} \sigma r dr$. За початок розрахункової ділянки прийняли площину $z = 0$, яка знаходиться на певній відстані від робочого торця катоду. Це дозволяє вважати потік дугової плазми в цій площині вісесиметричним і одновимірним у напрямку вісі OZ . Захисний газ з витратою G_2 подається через кільцевий канал $R_1 \dots R_2$ вісесиметричним потоком під кутом α до вісі симетрії системи. Анодний дріт розташований на відстані Z_2 від початку розрахункової області. Припускається, що в області анодної прив'язки струм дуги плавно зменшується і далі (при $z > Z_2$) відбувається безструмовий інерційний рух газу.

Система магнітогідродинамічних (МГД) рівнянь у наближенні турбулентного граничного шару для середніх по часу значень температури і швидкості плазми [3, 4]:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho \bar{v}) = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\eta} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(p + \mu_0 \frac{H^2}{2} \right); \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\chi} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{j^2}{\sigma} - \psi; \quad (3)$$

де T – середня температура плазми; $\bar{v} = (\rho v + \rho' v') / \rho$, де v – середня радіальна швидкість, r – середня густина плазми, r' і v' – пульсації густини і радіальної швидкості; u – середня аксіальна швидкість плазми; p – тиск, який в межах плазмofормуючого каналу визначається як

$$p = p_{ext} - \int_z^{Z_1} \frac{dp_c}{dz} dz + \mu_0 E \int_r^{R_c} \sigma H dr, \text{ а на відкритій}$$

$$\text{ділянці розряду } (z > Z_1) \quad p = p_{ext} + \mu_0 E \int_r^{R_c} \sigma H dr;$$

$C_p(T, p)$ – питома теплоємність при постійному тиску; s – питома електропровідність плазми; j – вектор щільності електричного струму; $\psi(T, p)$ – об'ємна густина потужності власного випромінювання; $\bar{\eta}$ і $\bar{\chi}$ – повні коефіцієнти динамічної в'язкості та теплопровідності плазми, що являють

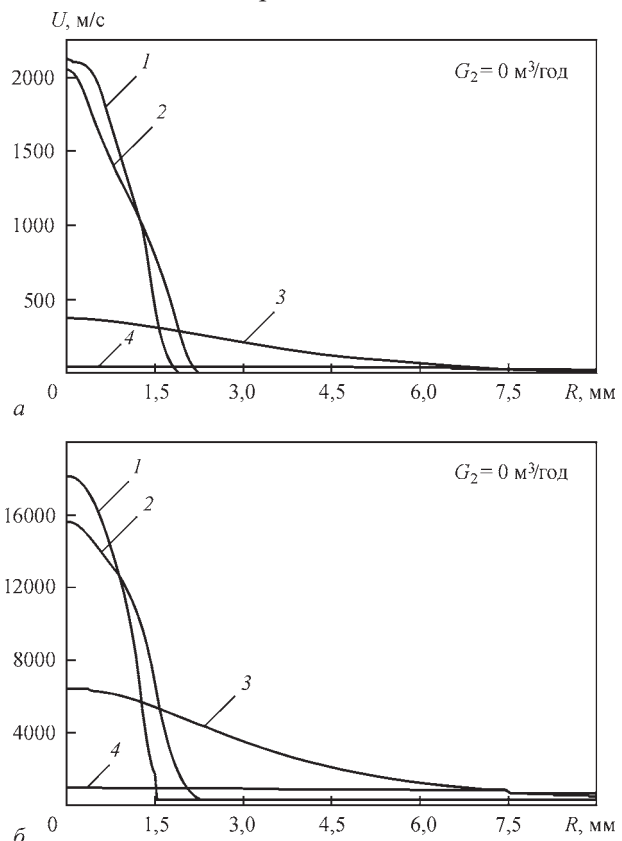
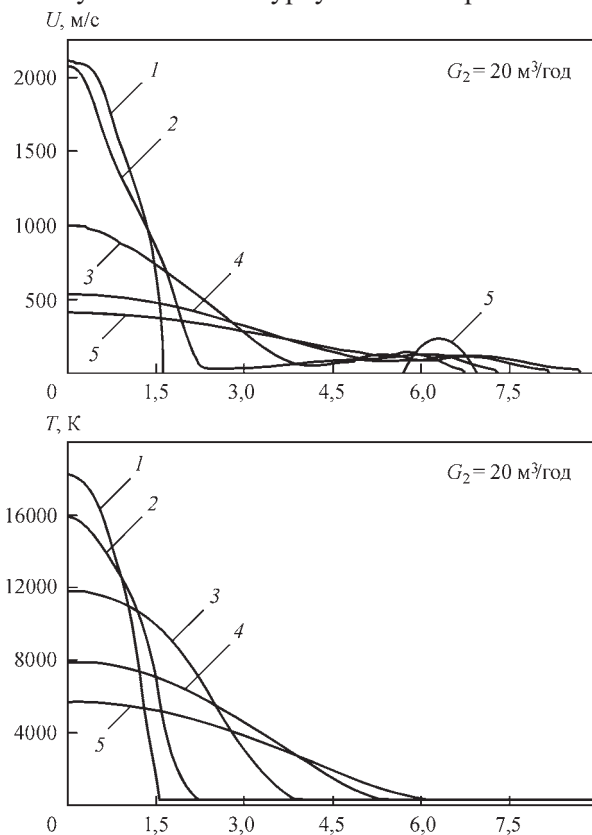


Рис. 2. Радіальні розподіли швидкості (а) і температури (б) плазми при $I = 200$ А і $G_1 = 1$ м³/год в областях [3, 4]: 1 – зріз сопла ($z = 3$ мм); 2 – область дроту-аноду ($z = 9,3$ мм); 3 – $z = 150$ мм; 4 – $z = 250$ мм

собою суми молекулярної і турбулентної в'язкості і теплопровідності відповідно; μ_0 – універсальна магнітна постійна; $H = \frac{1}{r} E \int_0^r \sigma r dr$ – азимутальна складова магнітного поля струму дуги.

Система МГД рівнянь разом із супутніми співвідношеннями, k - ϵ моделлю турбулентності і граничними умовами повністю визначає теплові та газодинамічні характеристики турбулентного потоку плазми як на дуговій, так і на інерційній ділянці течії. Ці рівняння складають основу уніфікованої математичної моделі, придатної для розрахунку просторових розподілів температури і швидкості дозвукових турбулентних плазмових потоків, які генеруються у нашому випадку плазмотроном з частково відкритою дугою при наявності супутнього газового потоку, який обдуває плазмову дугу.

За допомогою розробленої фізико-математичної моделі та програмного забезпечення для її комп'ютерної реалізації був проведений чисельний аналіз характеристик дозвукової турбулентної течії аргонної плазми, що генерується плазмотроном із плавким дротом-анодом при різних режимах його роботи (рис. 2, 3). Даний аналіз показав, що рівень витрат G_2 газового потоку, супутнього запиленому плазмовому, досить вагомо впливає на швидкість u і температуру T останнього. Із збільшенням величини G_2 величини u і T зростають прямо пропорційно. Доцільно використовувати супутній потік газу з витратами $G_2 = 20$ м³/год і більше.

В результаті чисельних досліджень в роботах [3, 4] встановлено, що обдування плазмового струменя супутнім потоком холодного газу перешкоджає його розширенню і суттєво збільшує його протяжність. Так, на відстані близько 50 мм від зрізу сопла плазмотрона ширина ядра плазмового потоку, що не обдувається захисним газом, приблизно в 2 рази перевищує аналогічний показник для струменя, що обдувається [3]. Концентрація аргону у високотемпературному ядрі плазмового стру-

меня, який обдувається захисним супутнім газом, лишається високою на значних відстанях (близько 0,5 на відстані 150 мм від зрізу сопла) [4]. В результаті плазмовий струмінь, що обдувається, значно довше зберігає свій імпульс та енергію і практично не змішується з супутнім газом.

Отже, з наведених в роботах [3, 4] чисельних розрахунків видно, що технологічний прийом застосування супутнього потоку, що обтискає плазмовий струмінь, суттєво впливає на характеристики запиленого плазмового струменя. Для всебічної оцінки доцільності застосування цього прийому в процесі плазмово-дугового напилення дротами-анодами необхідно більш повно дослідити його вплив як на розподіл температури і швидкості плазми, так і на структуру і властивості напилених покриттів із різних типів дровових матеріалів.

Методика експерименту. Технологічні експерименти з визначення впливу супутнього потоку на експлуатаційні властивості одержуваних покриттів проводили виходячи з наведених вище розрахункових рекомендацій. Для цього було розроблено лабораторний стенд на базі установки Plazer 30PL-W (модернізованої серійної установки УН-126) [6], яка була доукомплектована обладнанням для досліджень мікрометалургійних процесів, що включало тепловізійну та оригінальну відеооптичну систему фіксації процесу напилення [7–10]. В якості основи, що напилювали, використовували вуглецеву сталь марки сталь 20 (ГОСТ 16523-97). На пластини з цієї сталі напилювали компактні дроти діаметром 1,2...1,6 мм зі сталі 70 (ГОСТ 103-2006), 65Г (ГОСТ 103-2006), 18Х15Н3М (ГОСТ 103-2006), ніхрому Х20Н80 (ГОСТ 12766.1-90), міді М2 (ГОСТ 859-2001) і алюмінієвого сплаву АМг63 (ГОСТ 4784-97). Дріт з технічного нікелю НП1 (ГОСТ 492-2006) напилювали на високоміцний чавун із шаровим графітом ВЧ 35 (ГОСТ 7293-85).

Для оцінки міцності зчеплення покриттів $\sigma_{b.s.}$ із основою використовували величину руйнівного напруження в композиції «покриття–основа» при

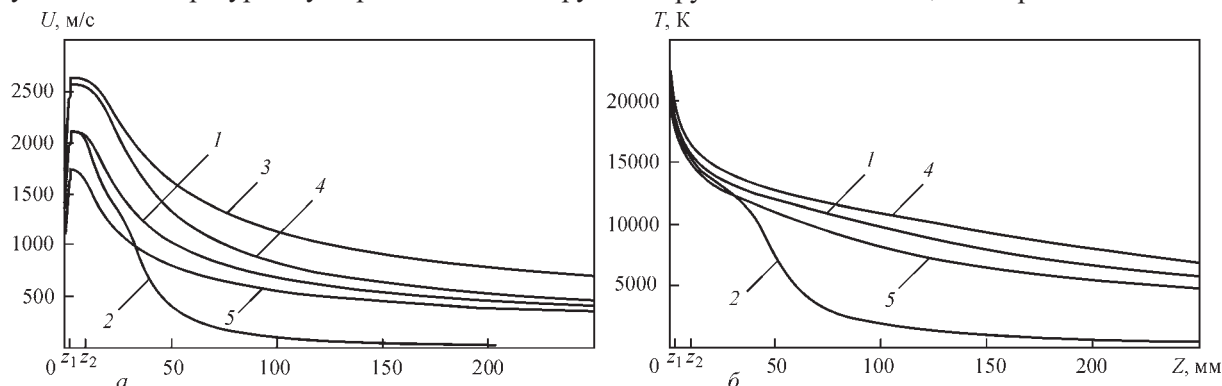


Рис. 3. Поздовжні зміни швидкості (а) і температури (б) плазми на вісі струменя за різних режимів роботи плазмотрона [3, 4]: 1 – $I = 200$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 2 – $I = 200$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 0$ м³/год; 3 – $I = 200$ А, $G_1 = 1,5$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 4 – $I = 260$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 5 – $I = 160$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год

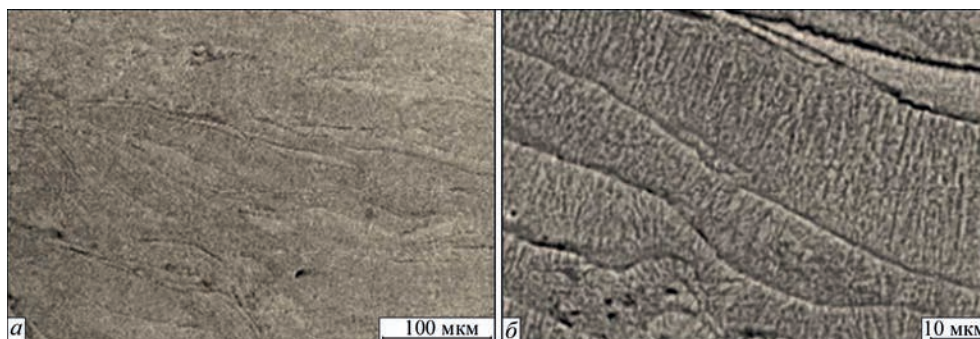


Рис. 4. Мікроструктура безпоруватого покриття із мідного дроту марки М2: а – до; б – після травлення

нормальному відриві, визначену за методикою «конусного штифта» [11]. Тріботехнічні випробування покриттів проводили за допомогою машини тертя 2070 СМТ-1 в умовах з обмеженим змащенням і без змащення по схемах «диск із покриттям – колодка (чавун СЧ-20, сталь 40Х, мідноазбестовий сплав, сталь 45)», «циліндр (чавун СЧНМД) – кільце (покриття)», «площина (сталь 20 – після цементації, бронза, СЧ-20) – покриття»; «диск – площина» (методика Амслера), а також при зворотньо-поступальному русі з амплітудою 61 мм, $V = 0,023$ м/с, $P = 11$ МПа [12]. Металографічні дослідження покриттів здійснювали на оптичних мікроскопах МІМ-7, МІМ-8, Neophot-23 при збільшенні до $\times 1000$. Склад речовин для травлення і режими травлення полірованих зразків вибирали відповідно до рекомендацій [13].

Стійкість при кавітаційному зношуванні визначали методом магнітострикційної вібрації. Зразки для випробувань готували відповідно до вимог стандарту ASTM G32-10. Випробування проводили при частоті $20 \pm 0,1$ кГц, амплітуді 55 ± 3 мкм і потужності ультразвукового генератора 500 Вт. В якості випробувального розчину використовувалася вода.

Аналіз експериментальних результатів. В якості супутнього захисного газу з витратами G_2 від 0 до 40 м³/год використовували стиснене повітря. Спочатку визначили вплив величини витрат G_2 на параметри технологічного режиму напилювання, зокрема, на коефіцієнт використання матеріалу (КВМ). Для цього змінювали величину G_2 , лишаючи інші параметри постійними: витрата плазмоутворюючого газу (аргону) $G_1 = 1,5$ м³/год; струм дуги $I = 200$ А; дистанція напилювання 160 мм; дріт-анод зі сталі 70 (діаметром 1,6 мм). Величину КВМ визначали за формулою: $\text{КВМ} = (m_c/m_w) \cdot 100\%$, де m_c – маса напиленого покриття, нанесеного за задану одиницю часу; m_w – маса дроту-аноду, розпиленого за задану одиницю часу. Було встановлено, що із збільшенням величини G_2 від 0 до 20 м³/год КВМ також поступово збільшується від 52 до 72 %. При $G_2 \geq 20$ м³/год КВМ перестає зростати і лишається стабільним – порядку 72 %.

За результатами подальшого проведення експериментів встановлено, що при збільшенні значень витрат G_2 від 0 до 40 м³/год ступінь вигорання легуючих елементів (С, Мn) в процесі напилювання із сталевого дроту 70 зменшується в середньому на 30...40 % порівняно із початковим хімічним складом цього дроту. При напилюванні дроту із нержавіючої сталі 18Х15Н3М вміст таких легуючих елементів, як Ni, Mo, W в покритті, в порівнянні з їх вмістом в напилюваному дроті, лишається практично незмінним. Встановлено, що при значеннях $G_2 = 20...40$ м³/год вміст кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких марок дротів із елементами із підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80 і АМг63, близькі до показників в напилених покриттях, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покритті менший в середньому в 1,5...2,0 рази.

Напилені покриття, отримані плазово-дуговим розпиленням мідного дроту-аноду марки М2, мають щільну шарувату структуру, характерну для плазових покриттів (рис. 4). Значення поруватості в основному знаходиться в межах 0,5...2,5 %. Встановлена тенденція до пониження цього показника із підвищенням значень витрат супутнього повітряного потоку. При значеннях $G_2 = 20...40$ м³/год, одночасно з оптимізацією таких параметрів як сила струму, витрата і тиск плазмоутворюючого газу, дистанція напилювання тощо, отримано безпоруваті покриття при напилюванні дротів із міді М2 (рис. 4), нержавіючої сталі (рис. 5), ніхрому, нікелю (рис. 6), алюміній-магнієвого сплаву АМг63.

Товщина ламелей в покритті в середньому складає 8...30 мкм, границі між ламелями бездефектні (рис. 5). Це непрямо свідчить про формування металургійного зв'язку між ними і реалізацію сукупності процесів мікрозварювання між раніш затверділими шарами в покритті та напилюваними розплавленими частками. Формування такого зв'язку є можливим лише за умов підвищення швидкості запиленого плазового струменю при його пришвидшенні супутнім потоком. Ще одним проявом ефективності впливу

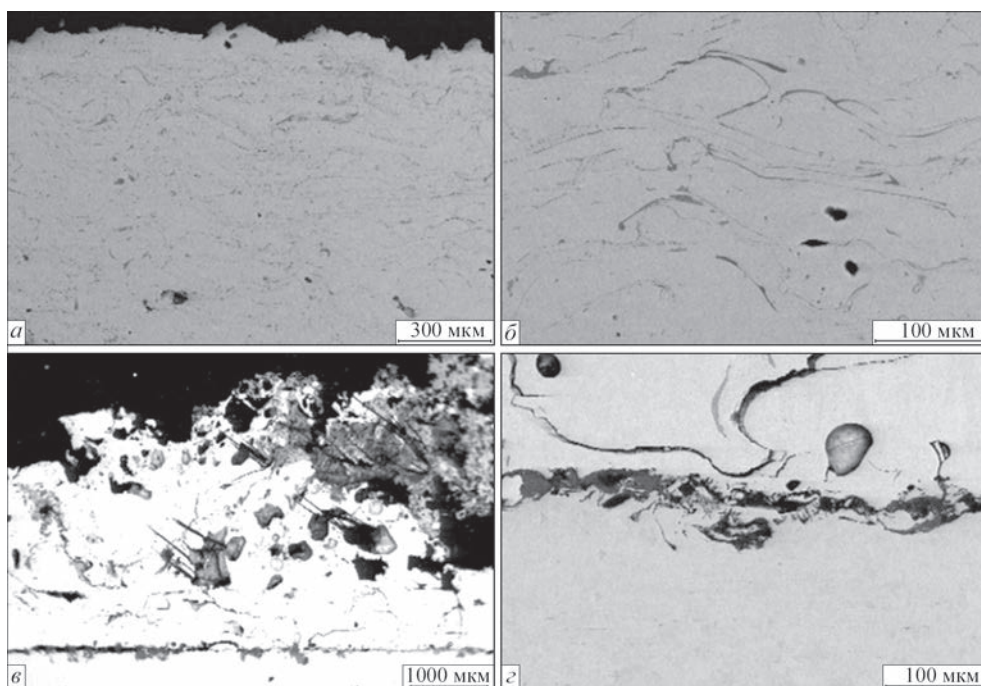


Рис. 5. Мікроструктури шарів покриттів, одержаних плазово-дуговим розпиленням рухомого дроту-аноду з нержавіючої сталі 18Х15Н3М, при витратах обтискаючого плазму супутнього повітряного потоку $G_2 = 40 \text{ м}^3/\text{год}$ (а, б) і $G_2 = 5 \text{ м}^3/\text{год}$ (в, г)

супутнього потоку на процес плазово-дугового напилювання є мінімізація утворення пор в одержаних шарах, яка чітко простежується при порівнянні результатів напилювання із різними витратами G_2 супутнього повітряного потоку (рис. 6).

При визначенні за штировою методикою міцності зчеплення напилених досліджуваним плазово-дуговим способом покриттів з основою встановлено, що на величину цього показника впливають витрати G_2 супутнього повітряного потоку, який витікає із кільцевого зазору між соплами плазмотрона. Приклад впливу витрат супутнього потоку повітря G_2 на міцність зчеплення покриттів $\sigma_{b.s.}$, отриманих плазово-дуговим напилюванням дротів (діаметром 1,6 мм) зі сталі 70 і міді М2 (відрив по нормалі, основа – сталь 20) наведено на рис. 7.

На міцність зчеплення напилених покриттів з основою впливає також сила струму I плазової дуги. При плазово-дуговому напиленні дроту

зі сталі 70 із підвищенням сили струму міцність зчеплення покриттів $\sigma_{b.s.}$ (відрив по нормалі, основа – сталь 20) спочатку зростала, а під кінець дещо зменшувалася. Напилювання при цьому проводили із наступними параметрами режиму: витрата плазмоутворюючого газу (аргону) $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$; витрата супутнього повітряного потоку, $G_2 = 40 \text{ м}^3/\text{год}$; дистанція напилювання 160 мм. Порівняння впливу на міцність зчеплення з основою параметрів G_1 і G_2 показало, що останній є більш вагомим.

Встановлено, що технологічний параметр витрати G_2 супутнього кільцевого повітряного потоку, який витікає із кільцевого зазору між соплами плазмотрона, впливає на підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкість при кавітаційному зношуванні. Так, наприклад, виявлено підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкість при кавітаційному зношуванні при зростанні G_2

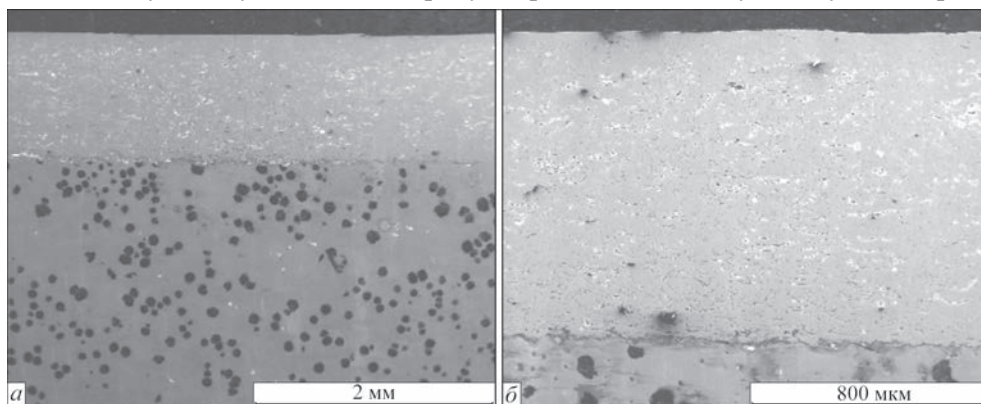


Рис. 6. Безпористе покриття, отримане плазово-дуговим напилюванням нікелевого дроту НП1 (основа – високоміцний чавун із шаровим графітом ВЧ 35)

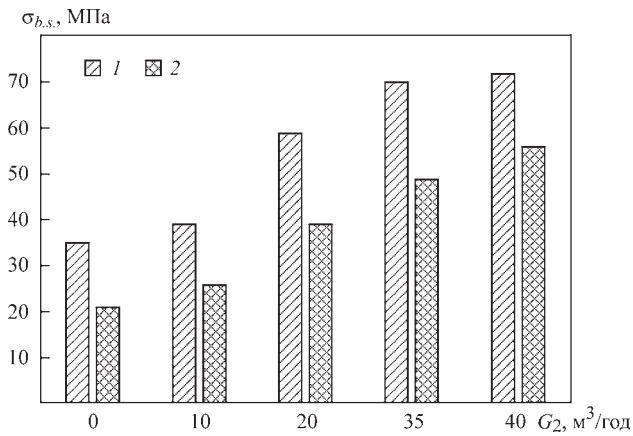


Рис. 7. Вплив витрат супутнього потоку повітря G_2 на міцність $\sigma_{b.s.}$ зчеплення покриттів із основою (сталь 20): 1 – сталь 70; 2 – мідь М2

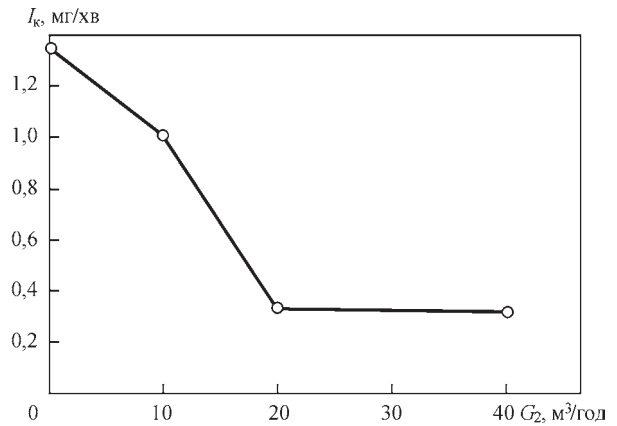


Рис. 8. Зміна інтенсивності кавітаційного зношування I_k залежно від витрат супутнього потоку G_2

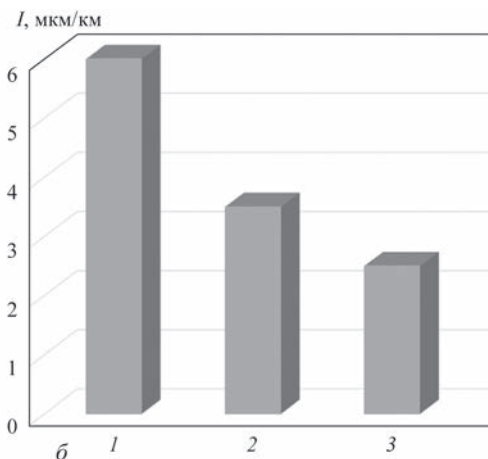
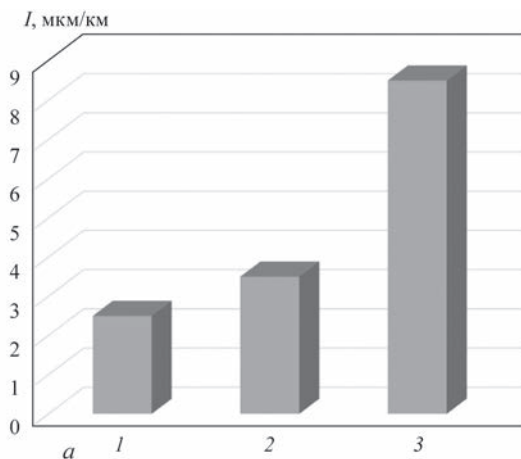


Рис. 9. Інтенсивність зношування I плазово-дугових покриттів, одержаних розпиленням дротів-анодів (контртіло – сталь 40Х; навантаження $P = 10$ МПа; швидкість $V = 1$ м/с; змащування – масло НС20, 30 крапель/хв; машина тертя 2070 СМТ-1): а – із сталей 65Г (1) і 70 (2) при $G_2 = 20$ м³/год у порівнянні зі сталлю 20 після цементації (3); б – із сталі 70 при витратах супутнього потоку: $G_2 = 5$ м³/год (1); 20 (2); 40 (3)

від 0 до 35...40 м³/год (рис. 8). Це можна пояснити підвищенням адгезійної міцності між шарами покриттів при збільшенні G_2 .

Проведення тріботехнічних випробувань покриттів, нанесених плазово-дуговим розпиленням компактних металевих дротів-анодів, показало позитивний вплив збільшення витрат G_2 супутнього потоку. За умов виконання тертя з обмеженим змащенням по схемах «диск із покриттям – колодка сталь 40Х» було встановлено, що нанесені при $G_2 = 20$ м³/год покриття з дротів зі сталей 65Г і 70 мають стійкість на 60...75 % більшу за сталь 20 у стані після цементації (рис. 9, а). При зменшенні витрат супутнього потоку ($G_2 = 5$ м³/год) зносостійкість покриттів зменшується, а при збільшенні ($G_2 = 40$ м³/год) – зростає (рис. 9, б).

Висновки

1. Дослідна перевірка результатів математичного прогнозування впливу кільцевого захисного потоку стисненого повітря, супутнього запиленому плазовому струменю, на результати плазово-дугового напилювання компактних дротів-анодів

показала ключову роль збільшення витрат цього потоку понад 20 м³/год у покращенні формування та якості покриттів, що напилюють.

2. Встановлена тенденція до зниження поруваності напилених покриттів з підвищенням значень витрат супутнього повітряного потоку G_2 і досягнення значень цього параметру в межах 0,5...2,5 %, а при $G_2 = 35...40$ м³/год. Отримано безпоруваті покриття при напилюванні дротів з міді М2, ніхром Х20Н80, нікелю НП1, алюміній-магнієвого сплаву АМг63.

3. Підтверджено, що при збільшенні значень витрат супутнього захисного повітряного потоку G_2 від 0 до 20...40 м³/год вигорання легуючих елементів (С, Мп) в процесі напилювання із сталей дротів марок 65Г і 70 зменшується в середньому на 30...40 %. При цьому вміст кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких матеріалів дротів із елементами з підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80 і АМг63, близькі до показників в напилених покриттях, а для випадку напилювання мідного дро-

ту М2 цей показник в покритті менший в середньому в 1,5...2,0 рази.

4. Встановлено вплив збільшення параметру витрат G_2 повітряного потоку, супутнього запиленому плазмовому струменю, на підвищення міцності зчеплення і зносостійкості покриттів. Показано, що при $G_2 = 20...40$ м³/год міцність зчеплення при відриві покриттів зі сталі 70 по нормалі досягає до 60...70 МПа, а покриттів з міді М2 – 40...55 МПа. Виявлено підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та стійкості при кавітаційному зношуванні при зростанні G_2 від 0 до 35...40 м³/год.

Список літератури/References

1. Babiak, Z., Wenz, T., Engl, L. (2006) Fundamentals of Thermal Spraying, Flame and Arc Spraying. *Modern Surface Technology*, CHAPTER 8, 119–136. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527608818.ch8>
2. Kawaguchi, Y., Miyazaki, F., Yamasaki, M. et al. (2017). Coating Qualities Deposited Using Three Different Thermal Spray Technologies in Relation with Temperatures and Velocities of Spray Droplets. *Coatings*, 7, 27, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings7020027>
3. Харламов М.Ю., Кривцун І.В., Коржик В.Н. и др. (2007) Математическая модель дуговой плазмы, генерируемой плазматроном с проволокой-анодом. *Автоматическая сварка*, 12, 14–20.
Kharlamov, M.Yu., Krivtsun, I.V., Korzhik, V.N. et al. (2007) Mathematical model of arc plasma generated by plasmatron with anode wire. *The Paton Welding J.*, 12, 9–14.
4. Харламов М.Ю., Кривцун І.В., Коржик В.Н., и др. (2008) Влияние рода газа спутного потока на характеристики дуговой плазмы, создаваемой плазматроном с проволокой-анодом. *Там же*, 6, 19–24.
Kharlamov, M.Yu., Krivtsun, I.V., Korzhik, V.N. et al. (2008) Effect of the type of concurrent gas flow on characteristics of the arc plasma generated by plasmatron with anode wire. *The Paton Welding J.*, 6, 14–18.
5. Ab, O. (2015) Atmospheric plasma spray process and associated spraying jet. *International Conference on Thermal spraying*, 77, 012008, 35–42.
6. Коржик В.Н., Короб М.Ф. (2012) Механизированная линия Plazer 30PL-W для плазменно-дугового проволочного напыления покрытий на крупногабаритные детали типа «вал». *Сварщик*, 4, 86, 13–15.
Korzhik, V.N., Korob, M.F. (2012) Mechanized line Plazer 30PL-W for plasma-arc wire spraying of coatings on large-sized parts of “shaft” type. *Svarshchik*, 4(86), 13–15 [in Russian].
7. Gulyaev, I.P., Gulyaev, P.Yu., Korzhik, V.N. et al. (2015) Experimental investigation of process of plasma-arc wire spraying. *The Paton Welding J.*, 3/4, 36–41.
8. Gulyaev, I., Dolmatov, A., Kharlamov, M. et al. (2015) Arc-Plasma Wire Spraying: An Optical Study of Process Phenomenology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24(11), 1566–1573.
9. Dolmatov, A.V., Gulyaev, I.P., Gulyaev, P.Yu., Iordan, V.I. (2016) Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 110, 012057, 1–6.
10. Dolmatov, A.V., Gulyaev, I.P., Jordan, V.I. (2015) The optical control system of dispersed phase properties in thermal spray process. *Ibid*, 81, 012041. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/81/1/012041>
11. Лунев В.М., Немашкало О.В. (2010) Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения. *Физическая инженерия поверхности*, 8, 1, 64–71.
Lunev, V.M., Nemashkalo, O.V. (2010) Adhesion characteristics of coatings and methods of their measurement. *Fizicheskaya Inzheneriya Poverkhnosti*, 8(1), 64–71 [in Russian].
12. Ashok Kumar, R.T., Nagendra, I.J., Uvaraj, Naik (2021) A Study on Tribological Behavior of Thermally Sprayed Coatings. *Journal of Advancements in Material Engineering*, 6, 1, 1–11.
13. Коваленко В.С. (1981) *Металлографические реактивы. Справочник*. Москва, Металлургия.
Kovalenko, V.S. (1981) *Metallographic reagents. In: Reference book*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

INFLUENCE OF ACCOMPANYING COMPRESSING AIR FLOW ON THE COATING STRUCTURE AND PROPERTIES IN PLASMA-ARC SPRAYING BY CONSUMABLE CURRENT-CONDUCTING WIRE

V.M. Korzhik¹, V.Yu. Khaskin¹, M.Yu. Kharlamov¹, Yao Yuhui², O.I. Demianov¹, D.V. Stroganov¹, V.O. Shcheretskiy¹

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Shenzhen Hanzhizi Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Road, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, (China), E-mail: 514929948@qq.com

The paper is devoted to studying the technological features of plasma-arc spraying by consumable current-conducting wire-anode. The relevance of applying such a process is related to the possibility of spraying directly by atomization of wires without the need to make powders from them. Experimental verification of the results of mathematical prediction of the influence of annular protective flow of compressed air, accompanying the particle-loaded plasma jet, on the results of plasma-arc spraying by compact wire anodes was performed. The key role of increasing this flow rate above 20 m³/h for improvement of the spray-deposited coating formation and quality was established. In spraying of coatings from compact wires porosity decreased with increase of the values of flow rates of accompanying air flow G_2 , and achievement of this parameter values within 0.5...2.5 %. Conducted experiments allow producing porefree coatings in spraying with wires from M2 copper, Kh20N80 nichrome, NP1 nickel, AMg63 aluminium-magnesium alloy. Studying these experimental results showed that at increase of the rate of accompanying protective air flow G_2 from 0 to 40 m³/h, the loss of alloying elements (C, Mn) during spraying by steels wires of 65G and 70 grades decreases by 30...40 % on average. Increase of the parameter of rate G_2 of the air flow accompanying the particle-loaded plasma jet influences improvement of the coating adhesion strength and wear resistance. So, at $G_2 = 20...40$ m³/h the adhesion strength at tearing off of coatings from steel 70 along the normal reaches 60...70 МПа, and that of coatings from M2 copper is 40...55 МПа. Wear resistance of coatings under the conditions of boundary friction and resistance at cavitation wear increases at G_2 increase from 0 to 40 m³/h, which is manifested in reduction of such wear from 1.35 to 0.32 mg/min. 13 Ref., 9 Fig.

Keywords: plasma-arc spraying, compact wires-anodes, accompanying flow, material utilization factor, coating adhesion strength, wear resistance

Надійшла до редакції 10.12.2021

ВПЛИВ СКЛАДУ КОМПОНЕНТІВ ШИХТИ ПОРОШКОВИХ СТРІЧОК СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ C–Fe–Cr–Mo НА ХІМІЧНУ ТА СТРУКТУРНУ НЕОДНОРІДНІСТЬ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

О.П. Ворончук, О.П. Жудра, Т.В. Кайда, В.О. Кочура, Л.М. Капітанчук, Л.М. Єремєєва

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

Загальновідомо, що зносостійкість наплавленого шару в зазначених сплавах залежить від характеристик армуючої фази, її концентрації та якостей сплаву матриці. Методами рентгеноструктурного, металографічного та мікрорентгеноспектрального аналізів металу типу 500X30M, наплавленого порошковими стрічками, встановлено залежність концентрації, форми, орієнтації, фазових складових та інтегральної твердості карбідів від виду введення в шихту основного карбідоутворюючого елементу – хрому. Встановлено, що максимальна концентрація карбідної фази до 80...90 % в наплавленому шарі досягається при введенні в шихту порошкової стрічки карбиду хрому Cr_3C_2 . В наплавленому металі для всіх зразків в основному присутні складні карбіди системи $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$. Молібден не утворює окремих карбідних сполук, а є складовою у карбідах типу $(\text{Cr}_{2.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Mo}_{0.2})\text{C}_3$. Велика концентрація карбідної складової призводить до вимивання карбідів в зв'язку зі значним зменшенням матричного сплаву. Оптимальна концентрація карбідної фази наплавленого порошковою стрічкою металу типу 500X30M досягається за рахунок введення в шихту електродного матеріалу карбідоутворюючого елементу – хрому при співвідношенні 15...25 % карбиду хрому та 75...85 % ферохрому. Бібліогр. 11, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: порошкова стрічка, карбід хрому, ферохром, карбіди, твердість, мікроструктура, матриця, концентрація

Вступ. Одним із ефективних та широко розповсюджених методів зміцнення деталей та підвищення терміну їх експлуатації є їх зносостійке наплавлення порошковими дротами або стрічками [1–3]. У зв'язку з неухильним зростанням потреб до підвищення працездатності обладнання у різних галузях промисловості виникає необхідність постійного удосконалення складів та якості електродних та присадних матеріалів для наплавлення.

Для наплавлення широкої гами деталей гірничо-металургійного комплексу традиційно застосовуються електродні (присадні) матеріали, які забезпечують одержання наплавленого металу типу високохромистого чавуну, стійкого в умовах абразивного та газоабразивного зношування [4–6]. Ефективність таких матеріалів в значній мірі залежить від концентрації карбідної фази в наплавленому металі, її орієнтації, структурних складових, а також якості сплаву-матриці [7–9].

Вказані характеристики наплавленого металу можуть суттєво відрізнитися в залежності від хімічного складу самих електродних та присадних матеріалів, а також від складу компонентів шихти порошкових дротів та стрічок.

Метою даної роботи є дослідження впливу карбідоутворюючих компонентів шихти порошкової стрічки ПЛ-АН180 на структуру та фазові складові наплавленого металу та розробка оптимального складу порошкової стрічки для одержання покриття, стійкого в умовах абразивного і газоабразивного зношування.

Методики та обладнання для проведення досліджень. Методами рентгеноструктурного, металографічного та мікрорентгеноспектрального аналізів досліджувався наплавлений метал типу 500X30M. Вимірювання твердості проводили на мікротвердомірі М-400 фірми «Лесо», для рентгеноспектральних, електронної спектроскопії та рентгеноструктурних досліджень використовували прилади JAMP-9500F та ДРОН-УМ1. Дослідження мікроструктури виконувалися за допомогою мікроскопу «Neophot-32».

Наплавлення зразків було виконано електродувим способом з використанням самозахисної порошкової стрічки ПЛ-АН180, яка забезпечує отримання наплавленого металу наступного хімічного складу, мас. %: 4,5 С; 30 Cr; 1 Мо. Порошкова стрічка ПЛ-АН180 використовується для наплавлення зносостійких біметалевих листів товщиною від 5 до 30 мм. Такі біметалеві листи шляхом розкрою, різки, гнуття легко трансформуються в широкий спектр деталей для різних металоконструкцій, подовжуючи їх працездатність. З використанням листів можуть бути виготовлені бункери, транспортери, трубопроводи, кузови самоскидів, футеровка дробильного та розмелювального обладнання, а також інші деталі і конструкції, які піддаються інтенсивному абразивному зношуванню [10].

В системі легування C–Fe–Cr–Mo у якості армуючої фази присутні в основному карбіди хрому, а у якості матриці – сплав на залізній основі. Було важливо визначити, як на концентрацію карбідів

та інші характеристики наплавленого шару впливає, в якому вигляді вводиться в шихту порошкової стрічки основний карбیدоутворюючий компонент – хром. Для введення хрому використовували високовуглецевий ферохром марки ФХ900 та карбід хрому. Останній по своєму хімічному складу близький до стехіометрії карбиду Cr_3C_2 .

Експериментальні дослідження та їх результати. Для дослідів були виготовлені порошкові стрічки перетином $16,5 \times 4,0$ мм з різним вмістом карбиду хрому та ферохрому:

- зразок 1 – 50 % карбиду хрому + 50 % FeCr;
- зразок 2 – з карбідом Cr, але без FeCr;
- зразок 3 – з FeCr, але без карбиду хрому.

При цьому інші компоненти шихти залишалися незмінними.

Наплавлення проводили в два шари для виключення впливу основного металу в робочій зоні наплавленого металу. В залежності від того, який склад шихти використовувався, змінювалось співвідношення фазових складових, і тим самим, інтегральна твердість наплавленого металу біля лінії сплавлення в першому і другому шарі. Також досліджувались розмір та орієнтація карбідів. В зразках № 1 об'ємна частка карбідів складає 63...65 об. %, інтегральна твердість по висоті наплавленого шару – 5400, 8100 і 9500 МПа відповідно, коефіцієнт форми складає 1,32, карбіди розорієнтовані. Орієнтація карбідів ланцетовид-

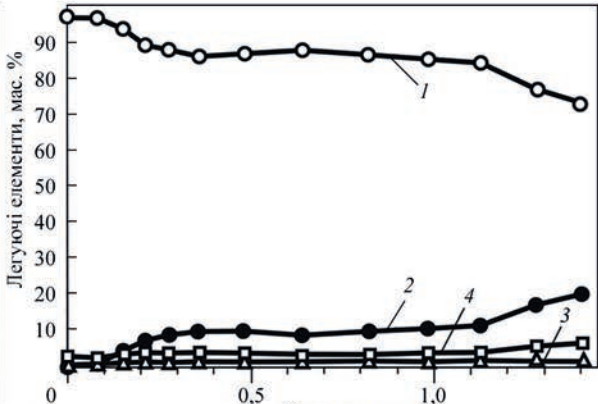
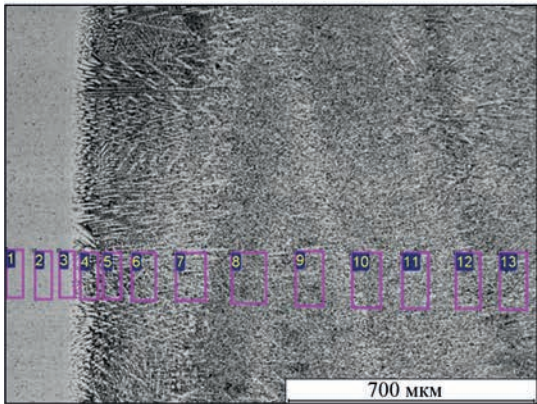
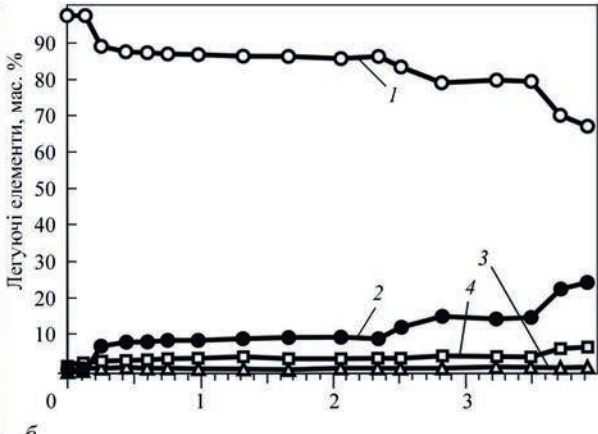
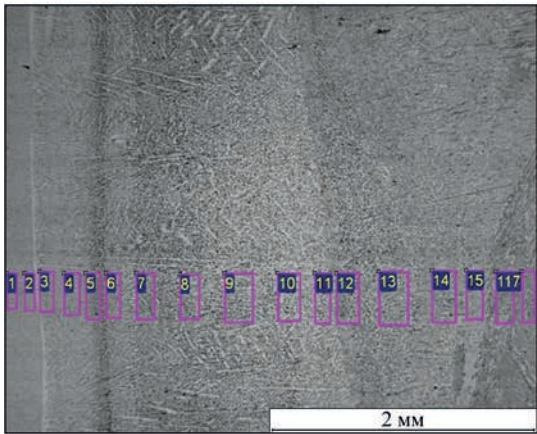
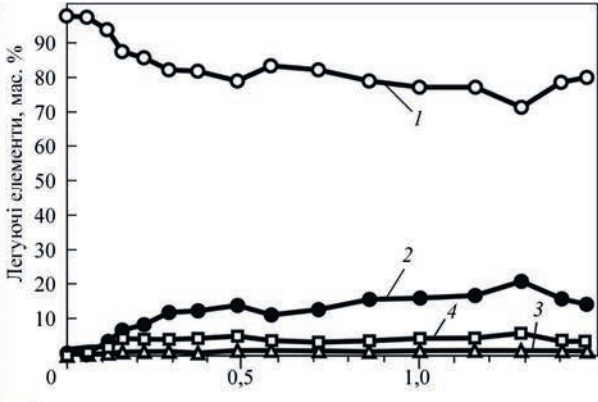
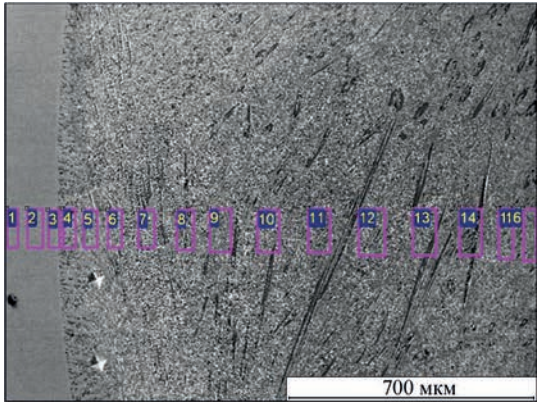


Рис. 1. Розподіл легуючих елементів по висоті наплавленого шару: а – зразок № 1; б – 2; в – 3 (1 – залізо; 2 – хром; 3 – молібден; 4 – вуглець)

ної форми переважно направлена вздовж лінії тепловідведення, карбіди гексагональної форми розорієнтовані. В зразках № 2 об'ємна частка карбідів складає 85...90 об. %, інтегральна твердість – 6100; 7200 і 10800 МПа, коефіцієнт форми – 3,57, карбіди розміщені переважно вздовж лінії тепловідведення. В зразках № 3 об'ємна частка карбідів складає 40...45 %, інтегральна твердість по висоті наплавлення – 5620; 6860 і 7100 МПа відповідно, коефіцієнт форми складає 1,19, орієнтація карбідів ланцетовидної форми переважно вздовж лінії тепловідведення, гексагональної форми – розорієнтовані. Коефіцієнт форми зростає при збільшенні вмісту карбіду хрому в шихті порошкової стрічки.

На рис. 1 представлені криві розподілу легуючих елементів по висоті наплавленого шару, що відповідають зміні інтегральної твердості.

Оптимальне поєднання зносостійкості та в'язкості наплавленого шару визначається типом та кількістю карбідної фази, її орієнтацією, а також будовою матриці. При аномально великій частці карбідної фази і співпадінні її орієнтації з напрямком абразивного потоку знижується зносостійкість наплавленого металу тому, що відбувається «вимивання» карбідної складової з матриці, яка збіднюється легуючими елементами.

Проведеними дослідженнями встановлено, що перехідна зона вздовж лінії сплавлення з першим шаром наплавленого металу в усіх випадках характеризується формуванням дендритів твердого розчину і карбідної евтектики в міждендрит-

ному просторі. Розміри зони з дендритною формою кристалізації коливаються: в зразку № 1 – 50...370 мкм, в зразку № 2 – 40...120 мкм та в зразку № 3 – 60...308 мкм. Типова структура перехідної зони основний метал – наплавлений шар всіх досліджуваних зразків представлена на рис. 2.

Методом рентгеноструктурного аналізу визначено кількісний фазовий склад, тип та параметри кристалічної ґратки наплавленого металу. Структура досліджуваних типів наплавленого металу являє собою аустенітну матрицю та карбідну фазу типу Cr_7C_3 , а також карбіди з дещо зміненими параметрами, що дає підстави припустити складне легування карбіду, формула якого аналогічна розрахунковій формулі $(Cr_{2,5}Fe_{4,3}Mo_{0,2})C_3$ з міжнародної бази кристалографічних даних Pcpdwin [11]. Карбідів Мо не виявлено, вочевидь, що при введенні Мо в сплав в кількості приблизно 1 % самостійні карбіди не утворюються, молібден ліквує в карбіди Cr.

Методом мікрорентгеноспектрального аналізу проведені дослідження розподілу легуючих елементів в структурних складових і визначено їх хімічний склад. При переході від першого до другого шару наплавленого металу змінюється характер структуроутворення – структура другого шару являє собою аустенітну матрицю з карбідами різної форми і орієнтації з поступовим їх укрупненням до поверхні наплавленого металу.

Типова структура другого шару наплавленого металу зразка № 1 наведена на рис. 3, а, а хімічний склад її фазових складових в табл. 1; зразка № 2 – на рис. 3, б і в табл. 2; зразка № 3 – на рис. 3, в і в табл. 3.

Обговорення результатів. З представлених даних прослідковується зменшення карбідоутворюючого елемента в аустенітній складовій на-

Таблиця 1. Масова частка елементів у місцях аналізу зразка № 1

Місце аналізу	C	Al	Si	Cr	Fe	Mo	Разом
1	8,94	0,04	0,02	53,56	36,35	1,08	100,00
2	9,23	0,00	0,00	51,37	38,59	0,81	100,00
3	9,00	0,02	0,01	53,75	36,42	0,80	100,00
4	9,16	0,05	0,00	53,66	36,23	0,89	100,00
5	3,16	1,12	0,75	8,75	85,45	0,78	100,00
6	2,58	1,00	0,77	9,75	85,57	0,34	100,00
7	2,11	0,59	0,83	8,15	86,87	1,44	100,00

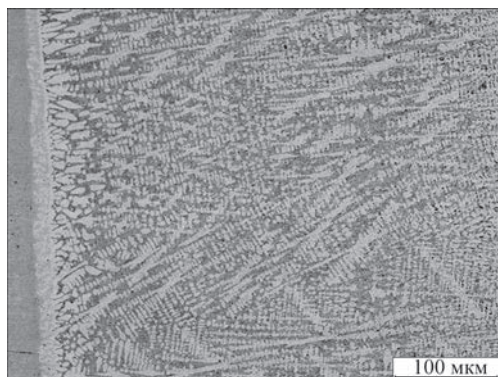


Рис. 2. Типова структура перехідної зони основний метал – наплавлений шар

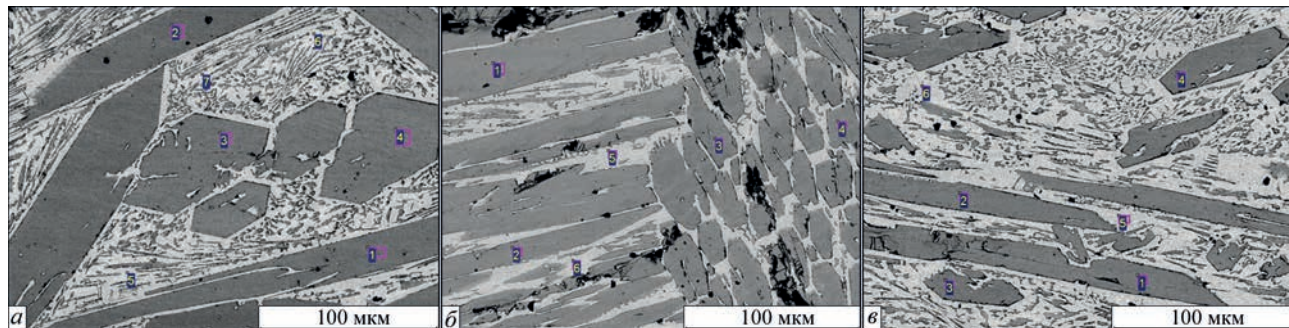


Рис. 3. Мікроструктура зразка: № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в)

Таблиця 2. Масова частка елементів у місцях аналізу зразка № 2

Місце аналізу	C	Al	Si	Cr	Fe	Mo	Разом
1	8,87	0,00	0,09	53,73	36,38	0,93	100,00
2	8,91	0,00	0,04	53,35	36,81	0,88	100,00
3	9,04	0,04	0,00	54,76	35,39	0,77	100,00
4	9,11	0,05	0,03	54,91	35,18	0,72	100,00
5	2,11	1,31	1,15	7,28	87,10	1,04	100,00
6	2,30	1,32	0,92	7,78	86,62	1,06	100,00

Таблиця 3. Масова частка елементів у місцях аналізу зразка № 3

Місце аналізу	C	Al	Si	Cr	Fe	Mo	Разом
1	9,28	0,02	0,04	53,24	36,02	1,40	100,00
2	8,80	0,00	0,01	52,27	38,16	0,75	100,00
3	8,73	0,00	0,05	52,63	37,49	1,10	100,00
4	9,22	0,01	0,00	52,88	36,80	1,10	100,00
5	2,12	0,65	0,60	11,98	83,89	0,75	100,00
6	2,23	0,69	0,64	10,27	85,16	1,01	100,00

плавленого металу в залежності від складу шихти, яка використовувалася при наплавленні.

Твердість в структурних складових ($P = 100$ г) в досліджуваних типах наплавленого металу практично не змінюється: $Au + K$ дрібні – 6100...6700 МПа (розділити аустеніт і дисперсні карбіди неможливо); твердість карбідів ланцетовидної форми – 16500...16800 МПа, гексагональної форми приблизно 11500...11800 МПа.

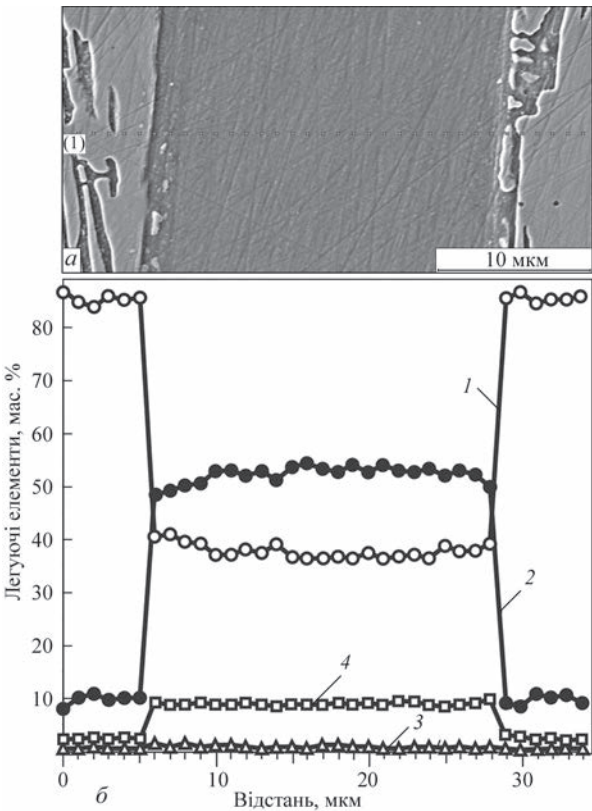


Рис. 4. Структура (а) та розподіл легуючих елементів у карбіді $(FeCr)_7C_3$ (б): 1 – залізо; 2 – хром; 3 – молібден; 4 – вуглець

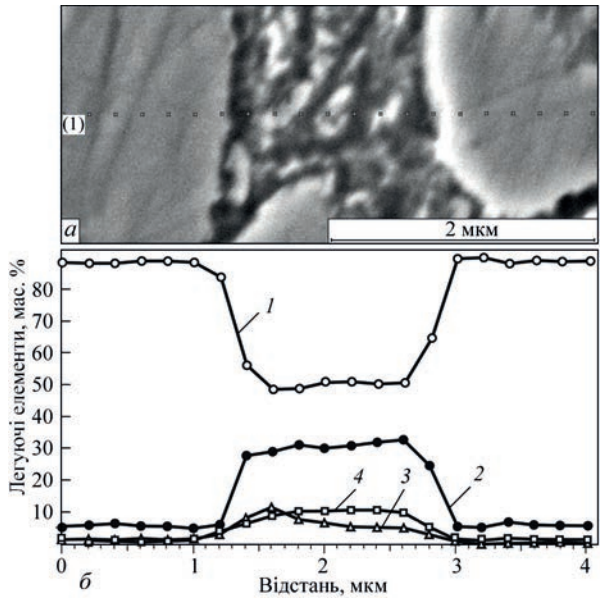


Рис. 5. Структура (а) та розподіл легуючих елементів у карбіді $(Cr_{2.5}Fe_{4.2}Mo_{0.2})C_3$ (б): 1 – залізо; 2 – хром; 3 – молібден; 4 – вуглець

Визначено склад та ступінь легування карбідів $(FeCr)_7C_3$, мас. %: 8,9...9,1 C; 52...53 Cr; 37,2...38,5 Fe; 0,2 Mo. А також іншого складу, мас. %: 9,5 C; 31,5...32,0 Cr; 50,8...52,0 Fe; 2,8...6,0 Mo, що практично підтверджує наявність карбиду, який описується формулою $(Cr_{2.5}Fe_{4.2}Mo_{0.2})C_3$. На рис. 4 та рис. 5 представлені типові криві лінійного розподілу легуючих елементів у карбідах $(FeCr)_7C_3$ та $(Cr_{2.5}Fe_{4.2}Mo_{0.2})C_3$. Слід відмітити, що по своїй структурі карбід $(Cr_{2.5}Fe_{4.2}Mo_{0.2})C_3$ неоднорідний (зразок № 1).

Тверді зносостійкі сплави неоднорідні по своїй структурі. На рис. 6 (зразок № 2) представлені типові криві розподілу легуючих елементів у структурних складових наплавленого металу, які

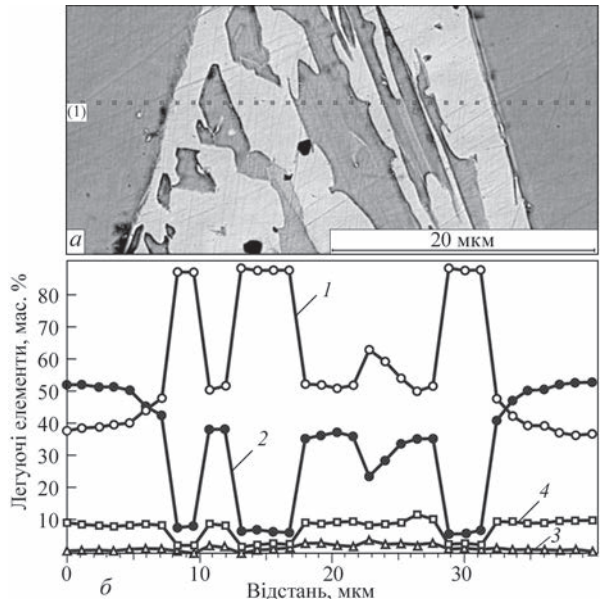


Рис. 6. Структура (а) та розподіл легуючих елементів у структурних складових наплавленого металу (б): 1 – залізо; 2 – хром; 3 – молібден; 4 – вуглець

демонструють неоднорідність структури та складу фазових складових і на яких добре прослідковується дифузійний перерозподіл легуючих елементів в зоні переходу з матриці в карбід.

Висновки

Дослідженнями встановлено, що оптимальна концентрація карбідної фази у металі, який наплавлено порошковою стрічкою типу ПЛ-АН180, досягається за рахунок введення в шихту електродного матеріалу карбідоутворюючого елементу – хрому при співвідношенні 15...25 % карбіду хрому та 75...85 % ферохрому. В наплавленому металі для всіх зразків в основному присутні складні карбіди системи $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$. Молібден не утворює окремих карбідних сполук, а є складовою у карбідах типу $(\text{Cr}_{2,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Mo}_{0,2})\text{C}_3$.

Список літератури

1. Рябцев И.А., Сенченков И.К., Турык Э.В. (2015) *Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
2. Рябцев И.А. (2005) Высокопроизводительная широко-слойная наплавка электродными проволоками и лентами. *Автоматическая сварка*, **6**, 36–41.
3. Походня И.К., Шлепаков В.Н., Максимов С.Ю., Рябцев И.А. (2010) Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой. *Там же*, **12**, 34–42.
4. Жудра А.П., Ворончук А.П. (2012) Наплавочные порошковые ленты (обзор). *Там же*, **1**, 39–44.
5. Кусков Ю.М., Богайчук И.Л., Черняк Я.П., Евдокимов А.И. (2013) Электрошлаковая наплавка чугуновой детали, изготовленных из высокохромистого чугуна. *Там же*, **8**, 47–49.
6. Кусков Ю.М., Евдокимов А.И. (2014) Электрошлаковая наплавка износостойких легированных чугунов. *Упрочняющие технологии и покрытия*, **10**, 21–24.
7. Лившиц Л.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. (1969) *Основы легирования наплавленного металла*. Москва, Машиностроение.
8. Кудинов В.Д., Филимонов Б.В., Шевнов С.А., Нетеса И.В. (1985) Наплавка композиционным сплавом дета-

лей металлургического оборудования. *Автоматическая сварка*, **5**, 48–50.

9. Ворончук А.П. (2009) Влияние концентрации твердых частиц на газоабразивную износостойкость композиционного сплава. *Там же*, **8**, 54–56.
10. Жудра А.П., Ворончук А.П., А.В. Петров, В.О. Кочура (2012) Технология, оборудование и материалы для производства листовых футеровочных элементов. *Сварочное производство*, **11**, 40–43.
11. (1973) Powder Diffraction File Search Manual. *Alphabetical Listing Inorganic*. Publication SMA-23, USA.

References

1. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, E.V. (2015) Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej ??.
2. Ryabtsev, I.A. (2005) High-efficiency wide-layer surfacing using electrode wires and strips (Review). *The Paton Welding J.*, **6**, 36–41 [in Russian].
3. 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**, 34–42.
4. Zhudra, A.P., Voronchuk, A.P. (2012) Cladding flux-cored strips (Review). *The Paton Welding J.*, **1**, 34–38.
5. Kuskov, Yu.M., Bogajchuk, I.L., Chernyak, Ya.P., Evdokimov, A.I. (2013) Electroslag surfacing of parts, made of high-chrome cast iron, using cast iron shot. *The Paton Welding J.*, **8**, 46–48.
6. Kuskov, Yu.M., Evdokimov, A.I. (2014) Electroslag surfacing of wear-resistant alloyed cast irons. *Uprochniayushchye Tekhnologii i Pokrytiya*, **10**, 21–24 [in Russian].
7. Livshits, L.S., Grinberg, N.A., Kurkumelli, E.G. (1969) *Principles of alloying of deposited metal*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Kudinov, V.D., Filimonov, B.V., Shevnov, S.A., Netesa, I.V. (1985) Surfacing with composite alloy of parts of metallurgical equipment. *Avtomatch. Svarka*, **5**, 48–50 [in Russian].
9. Voronchuk, A.P. (2009) Effect of concentration of hard particles on gas-abrasive wear resistance of composite alloy. *The Paton Welding J.*, **8**, 43–44.
10. Zhudra, A.P., Voronchuk, A.P., Petrov, A.V., Kochura, V.O. (2012) Technology, equipment and materials for manufacture of sheet lining elements. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 40–43 [in Russian].
11. (1973) Powder Diffraction File Search Manual. *Alphabetical Listing Inorganic*. Publication SMA-23, USA.

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF CHARGE COMPONENTS IN FLUX-CORED STRIPS OF C–Fe–Cr–Mo ALLOYING SYSTEM ON CHEMICAL AND STRUCTURAL HETEROGENEITY OF THE DEPOSITED METAL

O.P. Voronchuk, O.P. Zhudra, T.V. Kaida, V.O. Kochura, L.M. Kapitanchuk, L.M. Ereমেjeva

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

It is generally known that wear resistance of the deposited layer in the above-mentioned alloys depends on the reinforcing phase characteristics, its concentration and qualities of the matrix alloy. The methods of X-ray structural, metallographic analyses and X-ray microanalysis of metal of 500Kh30M type deposited by flux-cored strips revealed the dependence of the concentration, form, orientation, phase components and integral hardness of the carbides on the method of adding chromium as the main carbide forming element, to the charge. It is found that the maximum concentration of the carbide phase of up to 80...90 % in the deposited layer is achieved at addition of Cr_7C_3 chromium carbide to the flux-cored strip charge. Complex carbide systems - $(\text{CrFe})_7\text{C}_3\text{B}$ are mainly present in the deposited metal for all the samples. Molybdenum does not form any separate carbide compounds, but it is a component in carbides of $(\text{Cr}_{2,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Mo}_{0,2})\text{C}_3$ type. High concentration of the carbide component leads to carbide washout, in connection with a considerable reduction of the matrix alloy. Optimal concentration of the carbide phase in metal of 500X30M type deposited with flux-cored strip, is achieved by adding a carbide forming element – chromium to the electrode material charge in the proportion of 15...25 % chromium carbide and 75...85 % ferrochrome. 11 Ref., 3 Tabl, 6 Fig.

Keywords: flux-cored strip, chromium carbide, ferrochrome, carbides, hardness, microstructure, matrix, concentration

Надійшла до редакції 12.11.2021

АДИТИВНА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков, О.М. Берднікова

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

Метою роботи є створення адитивної електронно-променевої технології пошарового виготовлення металевих деталей з порошкових матеріалів. Для проведення досліджень виготовлений макет адитивного устаткування, розроблена програмно-апаратна платформа адитивного виробництва, винайдені технологічні прийоми та режими друку виробів заданої форми з прогнозованими властивостями міцності. Адитивним методом надруковані 25 експериментальних зразків для подальших випробувань. Кожному із виробів визначені швидкість переміщення променя, його потужність та струм динамічного фокусування. Досліджено вплив основних параметрів технологічного процесу наплавлення на формування та особливості структури поверхонь, хімічний склад зразків. Встановлено, що хімічний склад виробів відповідає складу сировини за винятком вмісту алюмінію, який занижений на 0,6...1,96 % відносно хімічного складу порошку. Для усунення цього недоліку необхідно в порошках титанових сплавів підтримувати вміст алюмінію на вищому рівні. За результатами досліджень на створеному обладнанні за комп'ютерними моделями надруковані вироби промислового та медичного призначення, режими друку яких оптимізовані. Із порошків титанових сплавів виготовлені макети статорних лопаток газотурбінного авіаційного двигуна, імплант черепної коробки людини та біопротези. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 15.

Ключові слова: адитивні технології, 3D принтер, електронно-променево наплавлення, металевий порошок, титановий сплав, хімічний склад, мікрорельєф поверхні

Інноваційні технології пошарового виготовлення виробів методом швидкого прототипування відкривають нові можливості для виробництва деталей заданої форми з прогнозованими властивостями.

Процес створення виробів таким методом із застосуванням електронного променя відносно новий, але успішно відкрив великі перспективи для виробництва широкої номенклатури виробів промислового та медичного призначення. В основу покладена операція пошарового сплавлення металів в вакуумі електронним променем. Цей підхід відрізняє швидкий перехід до виробництва тривимірних виробів безпосередньо від системи автоматизованого проектування з можливістю використання широкого спектру металів і сплавів, в тому числі тугоплавких та хімічно активних [1].

В Україні та світі є своєчасним створення адитивних технологій вирощування виробів методом електронно-променевого наплавлення. Оскільки вітчизняного устаткування не існує, актуальним є створення обладнання та програмного забезпечення для нього для реалізації адитивного виробництва, орієнтованого на впровадження на підприємствах авіакосмічної промисловості та турбінобудування, а також для потреб біомедичної галузі.

Фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України проведені дослі-

дження в сфері розробки технологій і обладнання для адитивного виробництва металевих деталей методом швидкого прототипування.

Об'єкт, мета, задачі та результати досліджень. Результати попередніх науково-дослідних робіт виявили можливість створення промислового обладнання для електронно-променевого сплавлення металевих порошкових матеріалів, а також можливість виготовлення адитивним методом виробів складної форми [2].

Авторами поставлена мета розробити адитивні електронно-променеві технології виготовлення виробів авіакосмічної промисловості і турбінобудування та створити макет адитивного обладнання.

Об'єктом досліджень були електронно-променеві технології вирощування виробів із застосуванням металевих порошкових матеріалів. Основні задачі – розробка макету адитивного устаткування та програмного забезпечення, створення технології друку виробів, виготовлення експериментальних зразків, дослідження їх властивостей та виробництво деталей промислового призначення.

В результаті виконання проекту створене унікальне для України обладнання для реалізації адитивного електронно-променевого виробництва, яке орієнтоване для впровадження на вітчизняних підприємствах авіакосмічної про-

мисловості та турбінобудування: АТ «Мотор Січ», ДП «ЛРЗ «Мотор», ДП КБ «Південне» та ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Обладнання також актуальне для потреб біомедичної галузі та машинобудування.

Технологія електронно-променевого наплавлення. Технологія електронно-променевого наплавлення подібна технології селективного лазерного спікання, яка широко застосовується у промисловості. Головна відмінність полягає у використанні електронного променя як джерела енергії замість лазера. В основі технології лежить можливість застосування пучка електронів високої потужності для сплавлення металевих порошків у вакуумній камері з утворенням послідовних шарів, які повторюють контури цифрової моделі виробу. На відміну від технологій лазерного спікання, електронно-променеве наплавлення дозволяє збільшити продуктивність за рахунок високої потужності гармат і електромагнітної, а не електромеханічної, розгортки променя [2].

Технологія надає можливість впродовж всього циклу виробництва забезпечити термостабільний процес виготовлення деталей. Температура в шахті, де створюється виріб, підтримується внаслідок дії електронного променя як джерела енергії. Перед наплавленням шар порошку розігрівається до температури близько 700...1000 °С, що дозволяє створювати деталі з меншими залишковими напруженнями, викликаними градієнтом температур між вже охолодженими і ще гарячими шарами. Термостабільний процес унеможливорює або значно зменшує утворення тріщин та дефектів формоутворення.

Крім того, повний переплавлення металевих порошків дозволяє отримати монолітні вироби, що забезпечує максимальну міцність. Готові вироби практично не відрізняються від литих деталей за механічними властивостями.

В процесі друку пристрій зчитує дані з файлу, що містить тривимірну цифрову модель виробу, та створює послідовні шари порошкового матеріалу. Контури шарів формуються сфокусованим електронним променем, який переплавляє металевий порошок в місцях зіткнення. Наплавлення проводиться в захищених вакуумних камерах, що надає можливість працювати з хімічно активними металами, чутливими до окислення, наприклад, з титаном та його сплавами [1].

Технологія пошарового електронно-променевого наплавлення в вакуумі дозволяє створювати щільні металеві вироби заданої форми з високою геометричною точністю [2].

Адитивне електронно-променеве устаткування. Технології та обладнання, які створені колективом Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, з самого початку орієнтовані на

потреби підприємств України. Для виробництва передбачається задіяти необхідну виробнику сировину. Цей підхід дає можливість забезпечити виробництво деталей і вузлів виходячи із потреб споживача та в тісному контакті з ним. Технології, що розробляються, дозволять знизити терміни впровадження у виробництво нових видів продукції, розширити її асортимент, а також створювати принципово нові види виробів із заздалегідь прогнозованими властивостями, виробництво яких неможливо без застосування методів 3D друку [1].

В останні роки помітною є тенденція впровадження адитивних технологій у провідних вітчизняних компаніях авіакосмічної промисловості і турбінобудування: ДП «КБ «Південне», АТ «Мотор Січ» і ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» [2].

Для вирішення поставлених задач були проведені дослідження з використанням обладнання для 3D друку.

Принцип роботи устаткування. Створене обладнання діє у складі адитивного електронно-променевого устаткування для сплавлення металевих порошкових матеріалів (рис. 1). Подача і дозування металевих порошків відбувається безпосередньо у вакуумній камері із бункерів, з яких металевий порошок надходить на робочий стіл під дією сил гравітації. За таким принципом подачі порошків застосування будь-яких механізмів дозування не передбачається. Після відбору певної кількості, порошок з бункерів автоматично подається насипом для підтримання достатнього рівня на столі.

Металевий порошок розплавляється під впливом електронного променя, який створюється електронно-променевою гарматою, де промінь фокусується і відхиляється відповідними системами.

Виріб формується пошарово, при цьому платформа, на якій вирощується деталь, опускається після формування кожного шару.

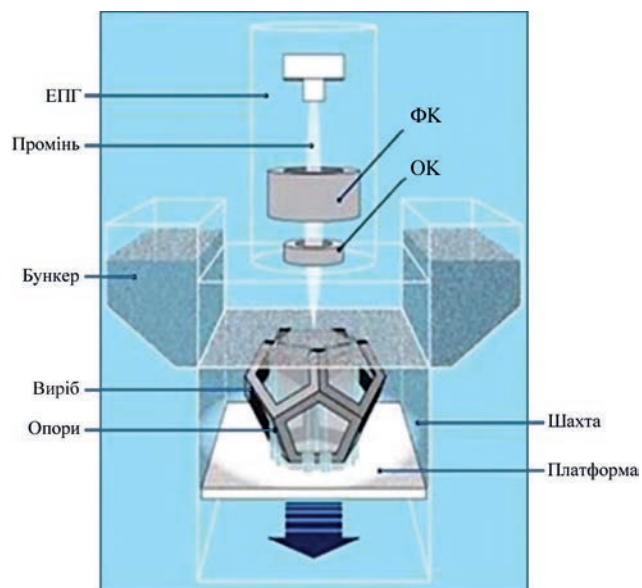


Рис. 1. Схема адитивного процесу

Технологічне устаткування. Для проведення досліджень був спроектований, виготовлений та налагоджений макет адитивного устаткування на базі малогабаритної установки для електронно-променевого зварювання типу СВ-212М.

Створене обладнання (рис. 2) складається із вакуумної камери 1, шахти 2, де знаходиться платформа 3 з палетою 10, на якій вирощується виріб. В бункерах 4 знаходиться металевий порошок, що подається насипом на стіл 5. Рейка 6 переміщується вздовж стола 5 та розподіляє металевий порошок на поверхні палети 10. Рейка закріплюється на направляючих 7. Переміщує рейку у горизонтальній площині актуатор 8 з електродвигуном 9.

Платформа 3 з палетою 10 знаходиться в шахті 2 та переміщується вздовж вертикальної вісі за допомогою пінолі 11, яка закріплена на рейці 12, встановленої на кронштейнах 13. Управляє переміщенням електродвигун 14.

Рефлектор 15 захищає вакуумну камеру від дії високої температури, яка виникає на поверхні шару, де формується виріб.

Фото створеного адитивного устаткування надане на рис. 3.

Обладнання (рис. 3) складається із малогабаритної вакуумної камери 1 з механізмами переміщення

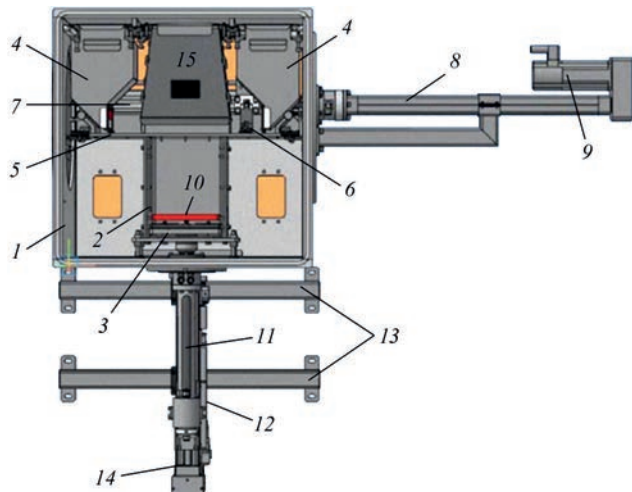


Рис. 2. Оснащення вакуумної камери (позначення 1–15 див. у тексті)



Рис. 3. Устаткування для електронно-променевого 3D-друку (позначення 1–9 див. у тексті)

ня платформи 8 та механізмами подачі і розподілу порошку 9. До складу енергоблоку устаткування входить електронно-променева гармата 2 та високовольтне джерело живлення 4. Електронно-променева гармата 2 розміщена на вакуумній камері. Вакуумна система устаткування забезпечує робочий тиск в камері краще ніж 10^{-4} Торр. Елементи системи управління обладнанням розташовані в шафах 3, де знаходяться блоки управління: високовольтним джерелом, вакуумною системою та управляючий контролер МСР. Високовольтне джерело 4 дозволяє отримати напругу 60 кВ і струм пучка електронів до 100 мА. Підсилювачі сигналів розгортки 5 та динамічного фокусування 6 формують технологічні розгортки електронного променя та його фокусування. Устаткуванням управляє промисловий комп'ютер 7.

Електрообладнання. Для управління електронним променем та технологічним устаткуванням розроблене, змонтоване та налагоджене обладнання:

- Енергетичний блок, який складається з:
 - джерела високої напруги 60 кВ;
 - електронно-променевої гармати з високовольтним кабелем.
- Система управління розгортками, у складі:
 - двоканальний підсилювач сигналів розгортки;
 - підсилювач сигналів динамічного фокусування.
- Контролер МСР, який управляє процесом друку.
- Електропривід механізмів переміщення Siemens Sinamics S120 з електродвигунами Siemens Simotics 1FK7.
- Промисловий комп'ютер з операційною системою Windows 10.
- Шафа управління, де розташоване комутаційне обладнання та контролер МСР.
- Шафа управління вакуумною системою.

Система управління. Система управління адитивним устаткуванням (рис. 4) побудована на основі апаратного контролера МСР, який управляє струмом пучка електронів, його розгортками, фокусуванням та механізмами переміщення. Контролер взаємодіє з промисловим комп'ютером ПК, де формуються моделі виробів та створюється виконавчий файл, в якому прописані алгоритми побудови виробу. З комп'ютера виконавчий файл через мережу Ethernet надходить до контролера МСР, який управляє устаткуванням 3D принтера.

Контролер формує аналогові сигнали управління розгортками електронного променя (рис. 4), що надходять до підсилювачів розгортки, до яких підключені відхиляючі котушки ЕПГ.

Пучок електронів за осями X і Y відхиляється та створює зону наплавлення необхідної фор-

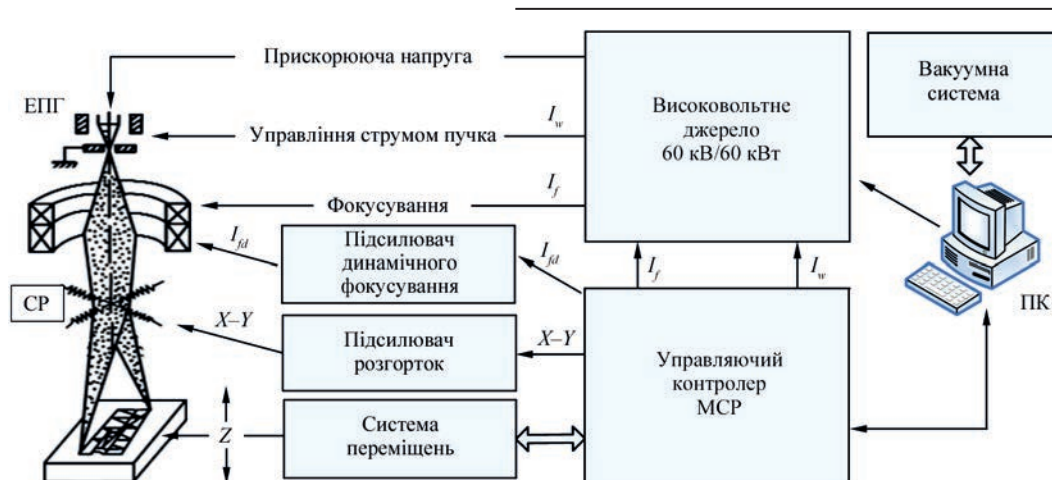


Рис. 4. Блок-схема управління обладнанням: ЕПГ – електронно-променева гармата; ФК – фокусуюча котушка; СР – система розгортки (інше див. у тексті)

ми. Процес наплавки виконується за програмою згідно з комп'ютерною моделлю виробу за попередньо встановленими технологічними режимами.

Також об'єктами управління є струм пучка електронів I_w , струм статичного I_f та динамічного I_{fd} фокусування.

Крім того, контролер управляє системою переміщень 3D принтера, яка включає механізми вертикального переміщення платформи (вісь Z) і горизонтального розподілу металевого порошку на платформі.

Промисловий комп'ютер управляє вакуумною системою устаткування та високовольтним джерелом живлення.

Програмно-апаратна платформа. Для управління адитивним устаткуванням спільно з компанією Materialise, Бельгія створена програмно-апаратна платформа, яка складається з управляючого контролера і пакета прикладного програмного забезпечення для реалізації адитивного виробництва [2].

Структура управляючої платформи та стан взаємодій між її компонентами надані на рис. 5 [2].

Програмне забезпечення. Створення 3D моделей виробів можливе із застосуванням будь-якого програмного забезпечення типу CAD. Аналіз і редагування моделей виконує програма Materialise Magics.

Підготовлена до друку комп'ютерна модель виробів далі обробляється програмою BuildProcessor, яка дозволяє розкласти моделі на шари, задати параметри і структуру їх формування, зазначити для кожного виробу налаштування потужності електронного променя, швидкості його переміщення, фокусування пучка електронів. Також програма надає можливість вибрати товщину шару, матеріал виробу та варіанти текстури заповнення шарів [2].

BuildProcessor формує виконавчий файл (job-file), який надходить до контролера МСР. Використовуючи job-file контролер скеровує процес друку.

Для управління устаткуванням під час друку застосовується програма MCP Operator interface, де задаються технологічні параметри обладнання, а також в режимі реального часу контролюється і відображається процес друку з можливістю корекції параметрів. Програма дозволяє обрати файл виробів, визначити час початку і кінця виробничого циклу та його стадію. Програма має тривимірну візуалізацію.

Налаштування управляючого контролера МСР та калібрування 3D принтера виконують в програмі Toolbox (рис. 5).

Етапи адитивного виробництва. Послідовність етапів адитивного електронно-променевого виробництва надана на рис. 6 [3].

Спочатку створюється 3D-модель об'єкта. Цю модель можна розробити з використанням систем автоматизованого проектування (CAD) або методами зворотної інженерії, наприклад, за допомогою об'єктного лазерного сканування. Отриманий CAD-файл необхідно перетворити у стандартний формат для адитивного виробництва, зазвичай це файл STL. Для максимального заощадження витрат та зменшення відходів слід оптимізувати розміщення та кількість об'єктів на платформі збірки. Зазвичай за один раз друкують кілька деталей. Комп'ютерна модель збірки ви-

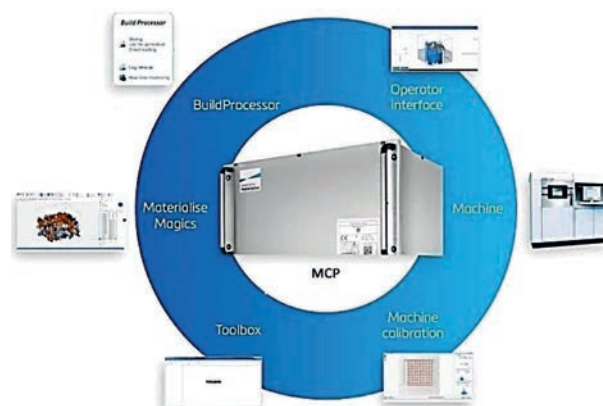


Рис. 5. Структура управляючої платформи

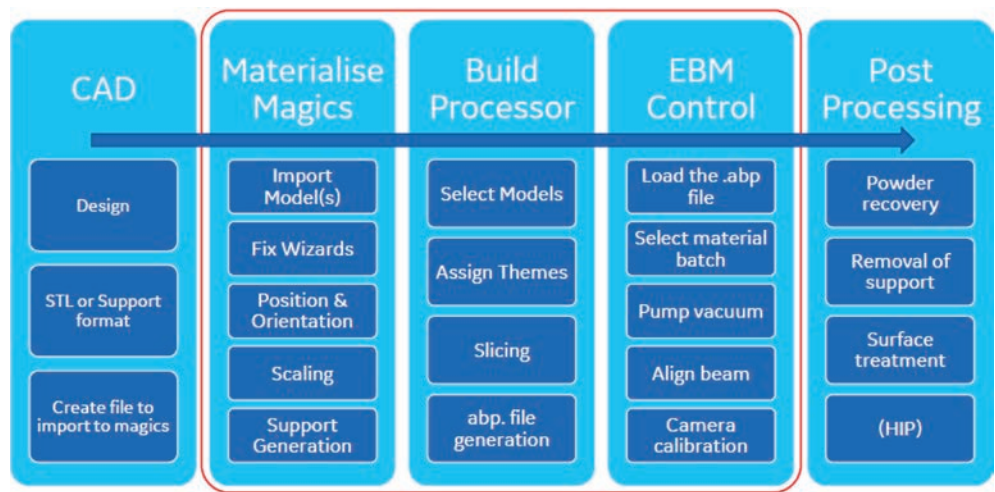


Рис. 6. Етапи адитивного електронно-променевого виробництва робів з використанням програмних засобів «нарізуються» на шари.

Наступний етап вимагає передачі файлу до адитивного устаткування та його налаштування. Далі 3D принтер будує вироби шар за шаром. Товщина шару визначає остаточну якість і залежить від особливостей технології друку. Розмір виробів залежить від можливостей устаткування. Після побудови і охолодження збірку можна зняти з устаткування.

Потім виконують очищення, полірування та оздоблення поверхні деталей. Також можлива додаткова їх обробка до потрібного стандарту. Це потребує використання інших машин та інструментів [4].

Зразки виробів та їх дослідження. На створеному макеті адитивного електронно-променевого обладнання надруковані експериментальні вироби для подальших випробувань.

Метою експерименту є дослідження впливу основних параметрів технологічного процесу наплавлення на якісні показники виробів [5].

Для цього передбачається надрукувати експериментальні зразки та випробувати їх властивості. Необхідно було дослідити: вплив параметрів друку на формування поверхонь виробів; особливості структури поверхонь; хімічний склад зразків; за результатами випробувань винайти оптимальні режими друку.

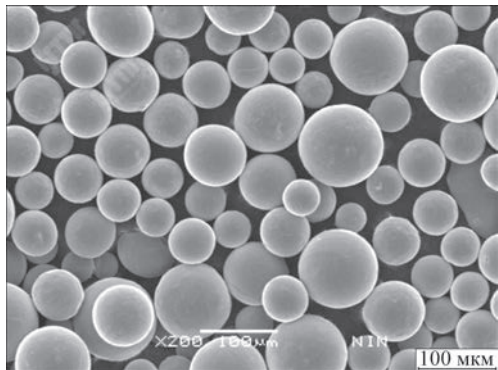


Рис. 7. Порошок Ti6Al4V ELI

Порошок Ti6Al4V ELI. Для друку зразків задіяний порошок титанового сплаву Ti6Al4V ELI виробництва китайської компанії Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd. Порошок отриманий методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP) [6]. Гранули порошку мають сферичну форму з мінімальними дефектами (рис. 7). Порошок PREP є найкращим для електронно-променевого адитивного виробництва [7].

Технологічні характеристики та хімічний склад порошку Ti6Al4V ELI надані в табл. 1 та табл. 2, відповідно [8].

Таблиця 1. Технологічні характеристики порошку Ti6Al4V ELI

Фракція, мкм		45...106
Розподіл по фракціях (PSD), мкм	D10	53...58
	D50	85...90
	D90	125...130
Плинність, с/50 г		20...25
Щільність, г/см³		2,5...2,7
Вміст кисню, ppm		500...1800

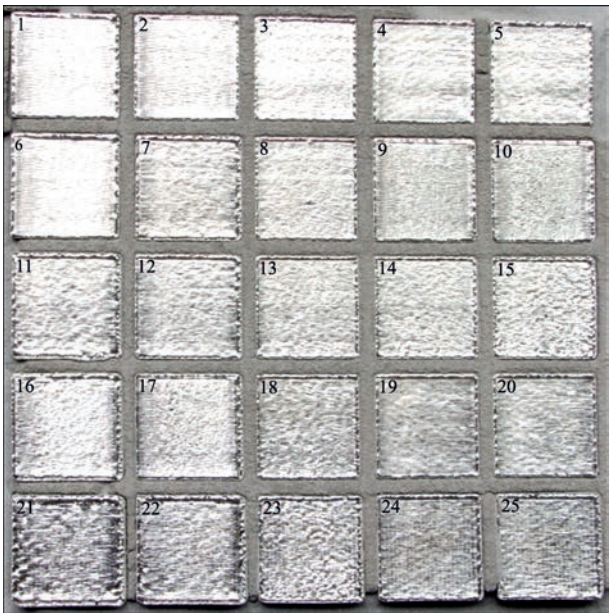


Рис. 8. Дослідні зразки

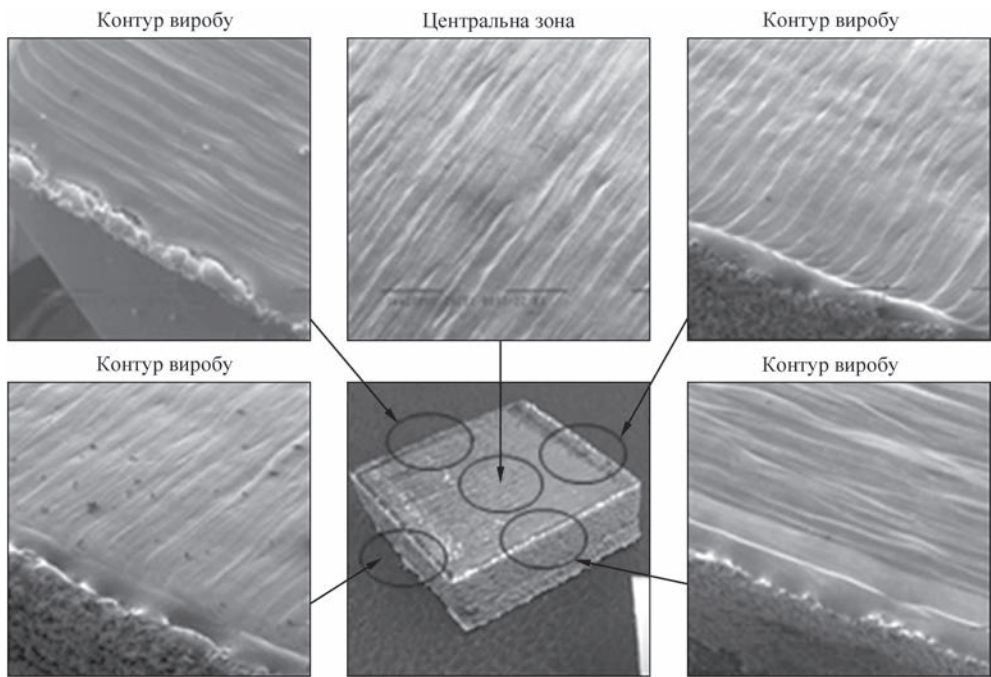


Рис. 9. Зразок виробу

Дослідні зразки. Із порошку титанового сплаву Ti6Al4V ELI для подальших випробувань виготовлені дослідні зразки виробів (рис. 8).

Отримані зразки (рис. 9) мають прямокутну форму розміром 24×24 мм та товщину 10 мм, з яких 5 мм складають технологічні опори і 5 мм – тіло виробу. Кількість надрукованих зразків – 25 шт.

Для друку зразків задані технологічні параметри:

- крок зміщення траєкторії променя – 0,2 мм;
- товщина шару порошку – 0,1 мм;
- стратегія сканування: двоспрямована з обертанням напрямку на 90° для кожного шару.

Для кожного зразка визначена швидкість переміщення променя та його потужність, заданий струм динамічного фокусування. Параметри друку зразків наведені в табл. 3.

Вплив технологічних параметрів на формування виробів. З метою вивчення впливу технологічних параметрів на формування виробів із порошку титанового сплаву Ti6Al4V ELI були проведені дослідження методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ, скануючий електронний

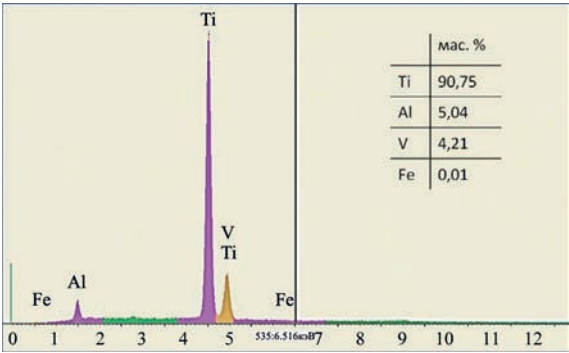


Рис. 10. Спектр зразка № 2

Таблиця 2. Хімічний склад порошку Ti6Al4V ELI

Склад легуючих елементів, мас. % часток				Склад домішок, мас. % часток		
Al	V	Fe	Ti	C	N	H
5,5...6,75	3,5...4,5	≤ 0,3	Основа	≤0,08	≤0,05	≤0,015

Таблиця 3. Технологічні режими наплавлення зразків

Номер зразка	Параметри променя		Струм динамічного фокусування, А
	Швидкість, мм/с	Потужність, Вт	
1	780	675	–0,9
2	780	675	–0,61
3	240	270	–0,9
4	540	495	–0,31
5	540	495	–0,61
6	780	675	–1,2
7	540	495	1,27
8	240	270	–0,61
9	780	675	–0,31
10	780	675	0,33
11	540	495	0,96
12	540	495	0,65
13	240	270	–0,31
14	240	270	0,33
15	240	270	0,65
16	780	675	0,65
17	780	675	0
18	240	270	–1,2
19	540	495	–0,9
20	540	495	–1,2
21	780	675	1,27
22	780	675	0,96
23	240	270	0
24	540	495	0
25	540	495	0,33

мікроскоп SEM-515 фірми Philips, Нідерланди). Було отримано дані про хімічний склад виробів. Досліджували зразки № 2, № 5 та № 8, які надруковані за різними режимами швидкості променя та його потужності: 780 мм/с/675 Вт (зразок № 2); 540 мм/с/495 Вт (зразок № 5); 240 мм/с/270 Вт (зразок № 8), але з однаковим значенням струму динамічного фокусування I_{df} : -0,61 А. Результати досліджень надані в табл. 4.

Встановлено, що вміст алюмінію занижений на 0,6...1,96 % відносно хімічного складу порошку (див. табл. 2). Можливо, відхилення пов'язане з підвищеною леткістю алюмінієвого пару в умовах наплавлення у високому вакуумі. Для усунення цього недоліку необхідно в порошках титанових сплавів підтримувати вміст алюмінію на вищому рівні. Вміст V відповідає складу порошку. Пік Fe у спектрі (рис. 10) практично відсутній (0...0,06 % Fe).

Подальше методом РЕМ для кожного зразка були отримані зображення мікрорельєфу поверхонь. Встановлено, що вироби характеризуються

Таблиця 4. Хімічний склад зразків

Номер виміру	Хімічні елементи, мас. %			
	Al	V	Fe	Ti
Зразок № 2				
1	5,04	4,21	0,01	90,75
2	4,85	4,33	0,06	90,76
3	5,09	4,40	0,02	90,48
Зразок № 5				
4	4,55	4,32	-	91,13
5	4,32	4,63	-	91,05
6	4,79	4,25	-	90,96
Зразок № 8				
7	5,00	4,28	-	90,72
8	5,17	4,04	-	90,79
9	4,90	4,38	-	90,72

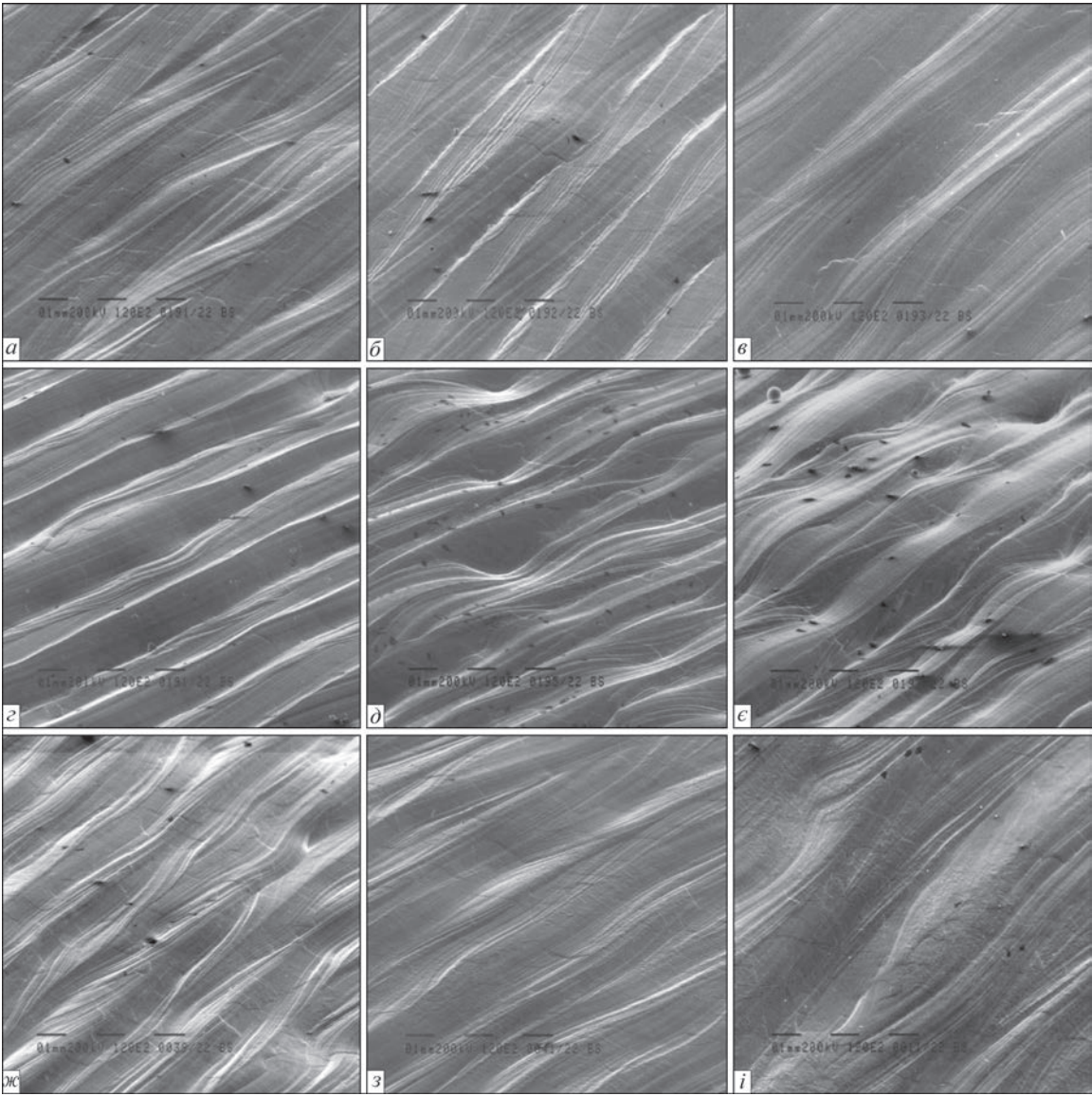


Рис. 11. Рельєф поверхні ($\times 120$) у центральній зоні зразків при швидкості променя 780 мм/с та потужності 675 Вт в залежності від струму динамічного фокусування (I_{df}): а – $I_{df} = -1,2$ А (зразок № 6); б – $I_{df} = -0,9$ А (зразок № 1); в – $I_{df} = -0,61$ А (зразок № 2); г – $I_{df} = -0,31$ А (зразок № 9); д – $I_{df} = 0$ А (зразок № 17); е – $I_{df} = 0,33$ А (зразок № 10); ж – $I_{df} = 0,65$ А (зразок № 16); з – $I_{df} = 0,96$ А (зразок № 22); і – $I_{df} = 1,27$ А (зразок № 21)

переважно однорідним мікрорельєфом профілю. Структура поверхонь, що формується у різних зонах в залежності від технологічних режимів, відрізняється за своєю морфологією.

Наприклад, з рис. 11 видно, що у центральній зоні зразків при швидкості променя 780 мм/с та потужності 675 Вт в залежності від струму динамічного фокусування (I_{df}) змінюється характер рельєфу поверхонь та параметри їх шорсткості.

Поверхням отриманих зразків характерен переважно смугастий тип при наявності чіткого напрямку (рис. 11). На деяких поверхнях спостерігаються ділянки з локальними мікронерівностями (рис. 11, *д–ж*). Також спостерігаються зміни у параметрах шорсткості мікрорельєфу поверхонь, а саме відстаней (або кроку) між нерівностями профілю поверхонь за вершинами та висотою рельєфу (рис. 11, *ж–і*).

Крім вказаних вище структурних характеристик поверхонь, в залежності від швидкості променя та потужності змінюється також загальний вигляд рельєфу поверхонь. Так, при зменшенні швидкості променя до 240 мм/с та потужності до 270 Вт формуються поверхні з іншим рельєфом при відсутності чітко вираженої смугастої структури при деякому укрупненні кроку нерівностей профілю поверхонь за вершинами (рис. 12). Такі структурні зміни можливо пов'язані з температурними умовами нагріву та охолодження при отриманні зразків.

Враховуючи викладене вище, виникає необхідність більш детальних досліджень параметрів мікрорельєфу поверхонь зразків, отриманих на різних технологічних режимах та зіставлення цих структурних характеристик в залежності від швидкостей променя та потужності, а також струму динамічного фокусування.

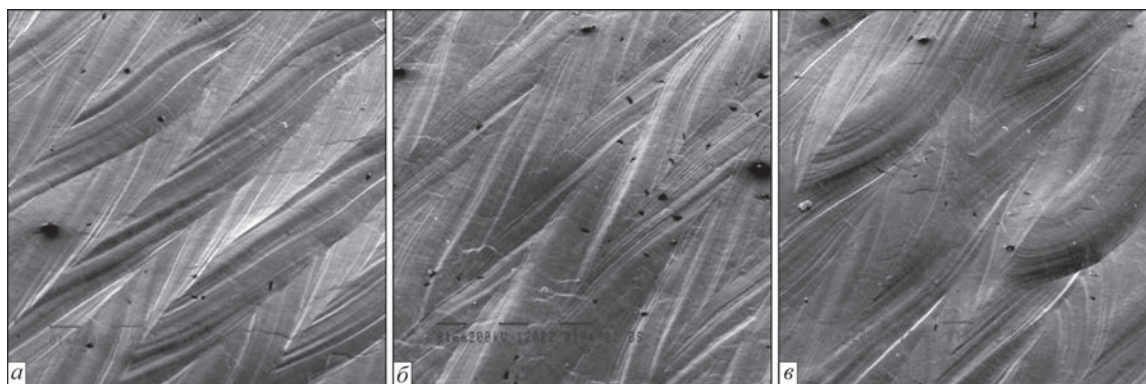


Рис. 12. Рельєф поверхні ($\times 120$) у центральній зоні зразків при швидкості променя 240 мм/с та потужності 270 Вт в залежності від струму динамічного фокусування (I_{df}): *а* – $I_{df} = -1,2$ А (зразок № 18); *б* – $I_{df} = -0,31$ А (зразок № 13); *в* – $I_{df} = 0,65$ А (зразок № 15)

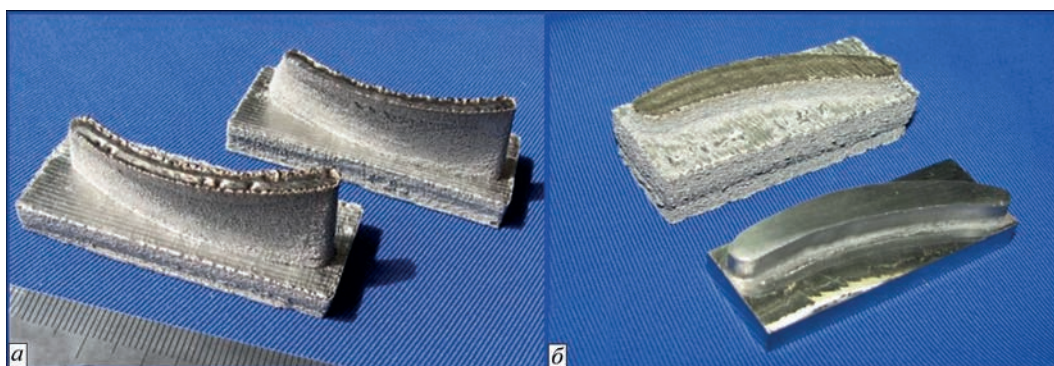


Рис. 13. Макети статорних лопаток газотурбінного авіаційного двигуна (опис *а, б* – див. у тексті)

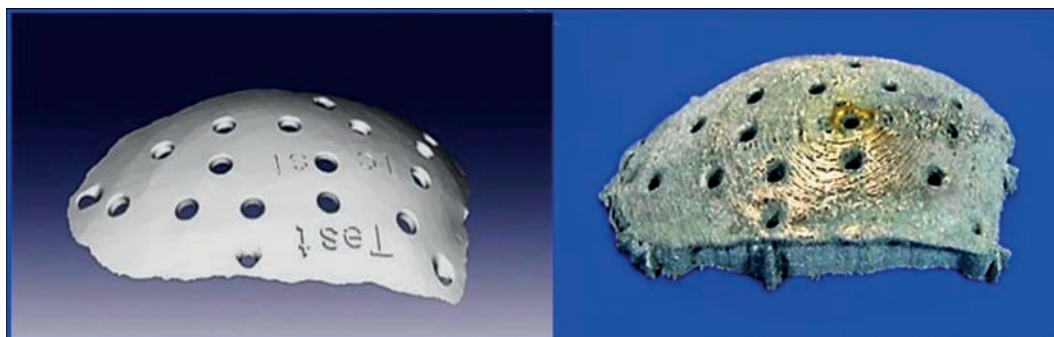


Рис. 14. Імплант черепної коробки. Модель та надрукований виріб

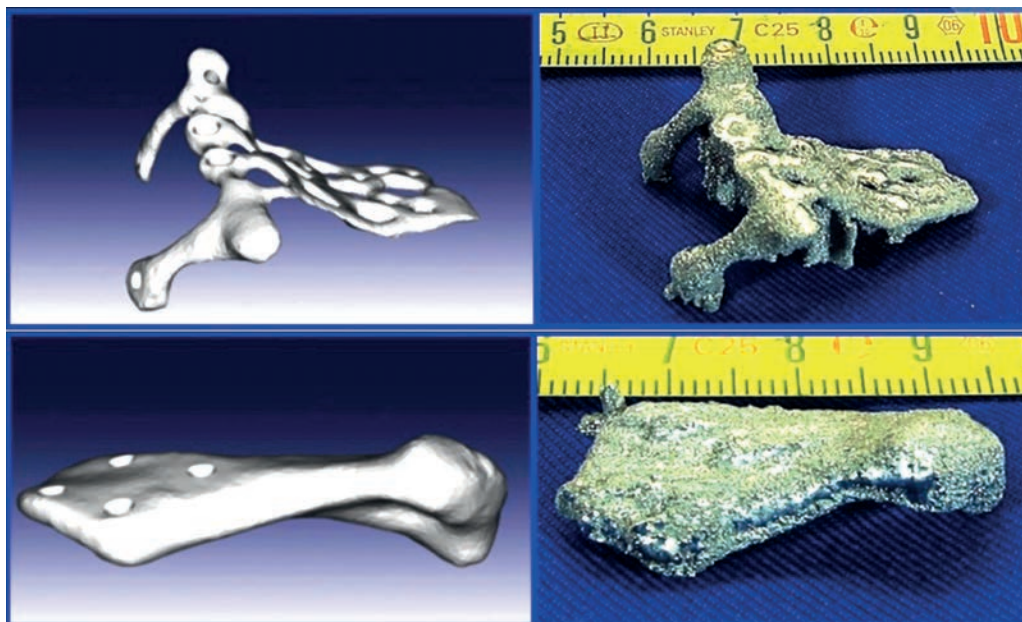


Рис. 15. Біопротези. Моделі та надруковані вироби

Тому наступні дослідження буде присвячено вивченню структури поверхонь зразків в декількох зонах (центральна зона та контур зразка) при різних збільшеннях, у тому числі вид поверхонь зверху та при нахилі зразків; виявленню дефектів (пор, несплавлень, мікронерівностей, включень); вимірюванню параметрів шорсткості мікрорельєфу у досліджуваних зонах, а саме відстаней між нерівностями профілю поверхонь за вершинами та висотою рельєфу.

Експериментальні зразки виробів. На створеному адитивному електронно-променевому обладнанні за комп'ютерними моделями надруковані вироби промислового та медичного призначення, режими друку яких оптимізовані за результатами попередніх досліджень.

На рис. 13 надані макети статорних лопаток газотурбінного авіаційного двигуна, які надруковані із металевих порошків титанових сплавів:

а) Ti6Al4V ELI, фракція 45...106 мкм, гранули сферичної форми, виготовлений за технологією PREP, виробник Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Китай;

б) BT-20, фракція 63...160 мкм, гранули довільної форми, виготовлений за технологією HDH, виробник ТОВ «Ті Текнолоджи», Україна.

На рис. 14 надані комп'ютерна модель та надрукований імплант черепної коробки людини, на рис. 15 – біопротези та їх моделі. Вироби виготовлені з порошку титанового сплаву Ti6Al4V ELI.

Висновки

За результатом науково-дослідних робіт розроблений та виготовлений макет адитивного устаткування, створена електронно-променева технологія пошарового наплавлення металевих виробів із порошкових матеріалів, надруковані експеримен-

тальні зразки виробів; проведено лабораторні дослідження зразків, виготовлені вироби промислового та медичного призначення.

Список літератури

1. Нестеренков В.М., Матвейчук В.А., Русыник М.О., Овчинников А.В. (2017) Применение аддитивных электронно-лучевых технологий для изготовления деталей из порошков титанового сплава. *Автоматическая сварка*, **3**, 5–10.
2. Матвейчук В.А., Нестеренков В.М. (2020) Адитивне електронно-променеве обладнання для пошарового виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів. *Автоматичне зварювання*, **2**, 44–49. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.08>
3. Stolt, R., Heikkinen, T., Elgh, F. (2018) Integrating Additive Manufacturing in the Design of Aerospace Components. *Conference: The 25th International Conference on Transdisciplinary Engineering (TE2018)*. Modena, Italy, July 2018. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-898-3-145>
4. Paria, Karimi (2018) Electron beam melting of Alloy 718 – Influence of process parameters on the microstructure. *University West, Department of Engineering Science. Division of Subtractive and Additive Manufacturing. Licentiate thesis, comprehensive summary*.
5. Günther, J., Brenne, F., Droste, M. et al. (2018) Design of novel materials for additive manufacturing – Isotropic microstructure and high defect tolerance. *Sci. Rep.*, **8**, 1, 1298.
6. Востриков А.В., Сухов Д.И. (2016) Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий – текущий статус и перспективы развития. *Труды ВИАМ*, **8**, 44, 17–23.
7. Ильюшенко А.Ф. (2019) *Аддитивные технологии и порошковая металлургия*. Минск, Медисон.
8. Powder Ti6Al4V ELI. *Сайт Sino-Euro Materials Technologies* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://en.csemt.com/ti/> 09.12.2021

References

1. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O. et al. (2017) Application of additive electron beam technologies for manufacture of parts of VT1-0 titanium alloy powders. *The Paton Welding J.*, **3**, 2-6.
2. Matviichuk, V.A., Nesterenkov, V.M. (2020) Additive electron beam equipment for layer-by-layer manufacture of metal products from powder materials. *The Paton Welding J.*, **2**, 41-46. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.08>
3. Stolt, R., Heikkinen, T., Elgh, F. (2018) Integrating additive manufacturing in the design of aerospace components. *In: Proc. of 25th Int. Conf. on Transdisciplinary Engineering*

- ing (TE2018) (Modena, Italy, July 2018). DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-898-3-145>
4. Paria, Karimi (2018) Electron beam melting of alloy 718: Influence of process parameters on the microstructure. *University West, Dept. of Engineering Sci. Division of Subtractive and Additive Manufacturing. Licentiate Thesis.*
 5. Günther, J., Brenne, F., Droste, M. et al. (2018) Design of novel materials for additive manufacturing: Isotropic microstructure and high defect tolerance. *Sci. Rep.*, **8**(1), 1298.
 6. Vostrikov, A.V., Sukhov, D.I. (2016) Manufacture of granules by PREP method for additive technologies: Current status and prospects of development. *Trudy VIAM*, **8**(44), 17–23 [in Russian].
 7. Iliyushchenko, A.F. (2019) *Additive technologies and powder metallurgy*. Minsk, Medison [in Russian].
 8. Powder Ti6Al4V ELI. Site: *Sino-Euro Materials Technologies*. <https://en.c-semt.com/ti/> 09.12.2021

ADDITIVE ELECTRON BEAM TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF METAL PRODUCTS FROM POWDER MATERIALS

V.A. Matviichuk, V.M. Nesterenkov, O.M. Berdnikova

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The aim of the work is to create additive electron beam technology of layer-by-layer manufacturing of metal parts from powder materials. To conduct investigations, a model of additive equipment was made, a software and hardware platform for additive manufacturing was designed, technological methods and modes of printing products of a set shape with predicted strength properties were invented. Applying the additive method, 25 experimental samples for further tests were printed. For each of the products, the speed of beam movement, its power and dynamic focusing current were determined. The influence of basic parameters of the technological process of surfacing on the formation and features of the surface structure and chemical composition of the samples were studied. It was established that the chemical composition of the products corresponds to the composition of raw materials except for the content of aluminum, which is underestimated by 0.6...1.96 % relative to the chemical composition of the powder. To eliminate this drawback, it is necessary to maintain the aluminum content in titanium alloy powders at the highest level. According to the results of investigations on the created equipment, computer and industrial products were printed on computer models, the printing modes of which are optimized. Of titanium alloy powders the models of stator blades of a gas turbine aircraft engine, human skull implant and bioprosthesis were manufactured. 8 Ref., 4 Tabl., 15 Fig.

Keywords: additive technology, 3D printer, electron beam surfacing, metal powder, titanium alloy, chemical composition, surface microrelief.

Надійшла до редакції 13.12.2021

XXI МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2022 МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

15 - 18 листопада

МЕТАЛОБРОБКА УКРЗВАРЮВАННЯ ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА ПІДШИПНИКИ УКРВОРТЕХ УКРИТВО АВТОМАТИЗАЦІЯ І РОБОТОТЕХНІКА ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА



Генеральний
інформаційний партнер:

**ОБОРУДОВАНИЕ
ИНЖЕНЕРИ**

Ексклюзивний
медіа партнер:

**ЖУРНАЛ
ГОЛОВНОГО
ІНЖЕНЕРА**

**МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**
м. Київ, Броварський пр-т, 15
станція метро «Лівобережна»

+38 (044) 201-11-65, (56)

plast@iec-expo.com.ua

www.iec-expo.com.ua



РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА РОЗРИВ

К.А. Ющенко, Б.О. Задерій, І.С. Гах, Г.В. Звягінцева, Т.О. Алексієнко

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

Визначені механічні властивості та досліджені особливості руйнування зварних з'єднань монокристалів жароміцних нікелевих сплавів при випробуванні на розтяг в інтервалі температур близьких до робочих. Встановлено дві характерні температурні області руйнування: 500...800, 800...1200 °С. У першій температурній області руйнування зварних зразків проходить по основному металу, при змішаному характері зламу – крихкий, квазікрихкий та в'язкий. У другій – руйнування проходить по металу шва, злам багатоосередковий, переважно крихкий з наявністю вторинних тріщин. Розглянуті особливості пов'язані в основному зі змінами вихідної структури монокристалу в результаті кристалізації та при охолодженні металу шва, головним чином – це формування багаторівневої субструктури, подрібнення дендритів, γ - та γ' -фаз, евтектичних утворень і карбідів при зменшенні дендритної ліквідації металу шва. Бібліогр. 23, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: монокристал, жароміцні нікелеві сплави, зварне з'єднання, шов, випробування на розрив, температурні області руйнування, особливості руйнування, мікроструктура

Вступ. Підвищення ефективності сучасних газотурбінних двигунів (ГТД) досягається за рахунок підвищення температури газу на вході в турбіну, шов свою чергу, висуває відповідні вимоги до жароміцності матеріалів, з яких виготовляються вузли та деталі гарячого тракту [1–3]. Забезпечення їх за рахунок використання жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) та багатокомпонентного легування, оптимізації структури, в тому числі, монокристалічної практично себе вичерпало. Рішення проблеми за рахунок зміни і оптимізації геометрії окремих деталей часто перетворюється в складну технологічну і економічну проблему. Особливо це помітно при вирощуванні однієї з відповідальних і складнонавантажених деталей ГТД – монокристалічної робочої лопатки з транспіраційним та іншим охолодженням. При цьому, поряд з отриманням досконалої монокристалічної структури певної кристалографічної орієнтації, необхідно забезпечити складну геометрію як зовнішньої поверхні лопатки, так і внутрішніх каналів охолодження певного перерізу і чистоти поверхні [3, 4].

Незважаючи на успіхи технології вирощування монокристалів методом спрямованої кристалізації, все більше вдаються до створення зварних, що складаються з окремих більш технологічних елементів конструкцій [5–10].

Питанням зварювання, як і вирощування монокристалів ЖНС, присвячено достатня кількість публікацій. Однак практично відсутні відомості про механічні властивості та особливості руйнування як зварних з'єднань в цілому, так і окремо зварних швів.

Метою цієї роботи було вивчення властивостей і особливостей руйнування зварних з'єднань монокристалів ЖНС при підвищених температурах з урахуванням необхідності розробки технології зварювання конструкцій.

Методики досліджень. В якості вихідного матеріалу для виконання роботи був обраний ЖНС широкого промислового використання ЖС26, хімічний склад сплаву, мас. %: 4,3...5,6 Cr, 4,5...8,0 Al, 0,8...1,2 Ti, 0,8...1,4 Mo, 10,9...12,5 W, 8,0...10,0 Co, 1,4...1,8 Nb, 0,22...0,27 Mn, 0,9...1,1 Fe, 0,8...1,2 V, 0,13...0,18 C. Зварювання зразків товщиною 1,5...2,5 мм, вирізаних з плоских заготовок, отриманих методом спрямованої високоградієнтної кристалізації, здійснювалося електронним променем як найбільш прецизійним і поширеним в авіамоторобудуванні способом. Режимом і кристалографічна орієнтація зразків вибиралися з умови якісного формування швів, збереження вихідної кристалографічної орієнтації (допускалося відхилення не більше 10°), забезпечення досконалості монокристалічної структури (відсутність великокутових границь зерен) металу шва [7, 11–13]. Зразки для зварювання, випробувань, досліджень вирізалися електроіскровим методом з наступним шліфуванням. Перетин і довжина робочої частини розривних зразків становили $\sim 4 \text{ мм}^2$ і 18 мм відповідно.

Механічні випробування виконували на установці «АЛЛО-ТОО» типу Gleeble в камері з залишковим тиском $< 10^{-2} \text{ Па}$ при швидкості навантаження $1,84 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Діапазон температур, при яких проводилися випробування, становив 500...1200 °С, що

Ющенко К.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6276-7843>, Гах І.С. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-4234>,
Звягінцева Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6450-4887>, Алексієнко Т.О. – <https://orcid.org/0000-0001-8492-753X>
© К.А. Ющенко, Б.О. Задерій, І.С. Гах, Г.В. Звягінцева, Т.О. Алексієнко, 2022

відповідало середнім експлуатаційним параметрам робочих лопаток ГТД зі сплаву ЖС26. Контроль температури, реєстрація навантаження і подання у графічному вигляді залежностей «навантаження–переміщення» здійснювалося з використанням програмного забезпечення [14].

Випробовувалися зразки двох типів: з поздовжнім і поперечним розташуванням шва по відношенню до напрямку навантаження (рис. 1). Оскільки перетин шва і зразка з його поздовжнім розташуванням (рис. 1, б) збігаються, то їх випро-

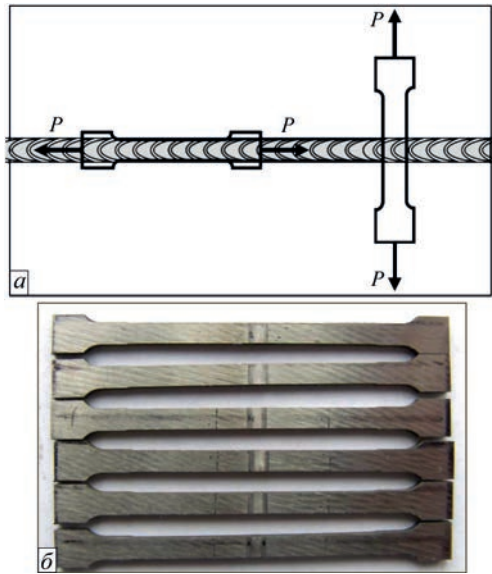


Рис. 1. Схема вирізки розривних зразків із зварних з'єднань монокристалів ЖНС і орієнтація навантаження P при випробуванні (а) та загальний вигляд розривних зразків (б)

бування дозволяє оцінити вплив структурних змін внаслідок електронно-променевого переплаву та кристалізації при зварюванні монокристалу. Випробування зразків з поперечним розташуванням шва дає уявлення про поведінку під час випробування зварного з'єднання в цілому, що складається з поєднання різних структурних ділянок – основний метал, зона термічного впливу, метал шва.

Кристалографічна орієнтація вихідних зразків, зварних з'єднань і елементів структури оцінювалася із залученням методики рентгенівської дифрактометрії шляхом аналізу розподілу інтенсивності відображення на полюсних фігурах, θ -2 θ рентгенограмах ($Iq_{||}$) і в площині, перпендикулярній дифракційному вектору q - $Iq_{\perp}$ [15–17]. Структурний стан зварних з'єднань і характер зламів вивчали методами оптичної мікроскопії («МІМ-7», «Неофот-32»), електронної скануючої мікроскопії (Camskan-4, SEM-515 PHILIPS), розподіл хімічних елементів в окремих складових зламу та структури – за допомогою аналізу ЕДХ на мікроскопі JEOL с приставкою JNCO.

Результати та обговорення. *Структура зварних з'єднань.* Зварюваний сплав (основний метал) у вихідному стані характеризується розвинутою комірково-дендритною структурою, що включає дрібнодисперсну зміцнюючу γ' -фазу (Ni_3Al), рівномірно розподілену у γ -твердому розчині нікелевої матриці (рис. 2, а) з окремими включеннями γ - γ' евтектичних утворень і виділень карбідів складного складу та топографії. Евтектичні утворення та карбіди переважно розташовуються

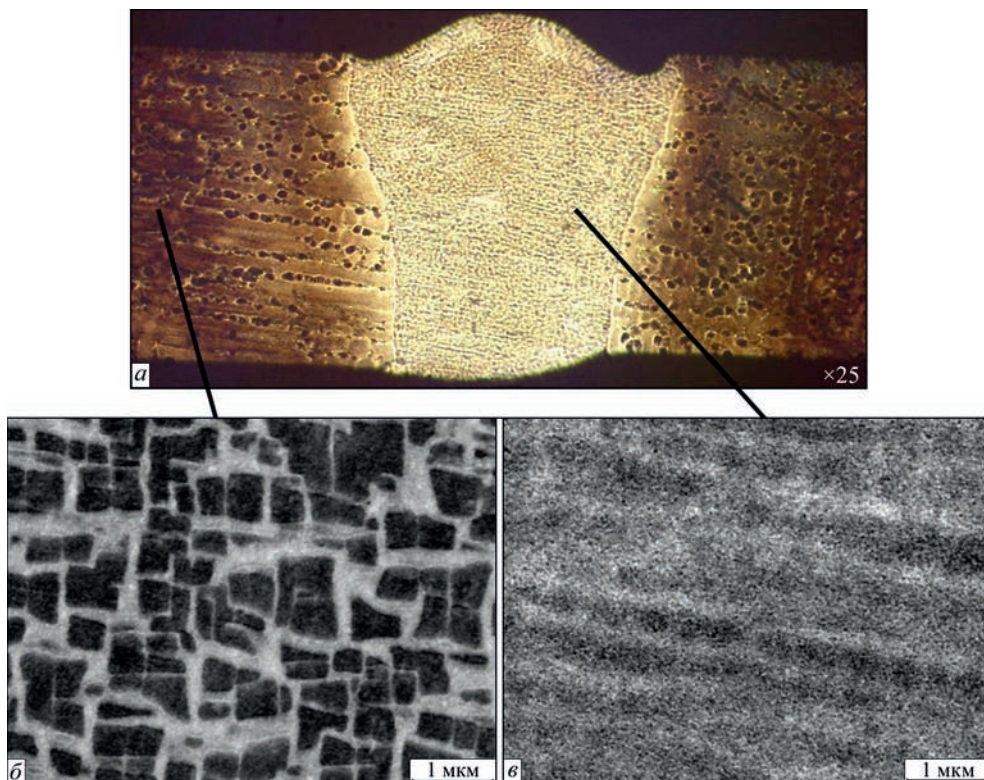


Рис. 2. Макроструктура зварного з'єднання (а), мікроструктура (γ/γ') вихідного металу (б) і шва (в) монокристалу ЖНС

в міждендритних, міжфазних проміжках. Вміст γ' -фази в сплаві становить $\sim 61\%$.

Структура зварного з'єднання відрізняється від структури основного металу помітно меншими розмірами структурних складових. Так, якщо міждендритна відстань (λ) основного металу становить $200 \dots 300$ мкм, то в шві вона зменшується до $30 \dots 50$ мкм у вісі шва і до $3 \dots 12$ мкм у лінії сплавлення (рис. 2, б). Розмір частинок γ' -фази ($d_{\gamma'}$) у вихідному металі – $0,3 \dots 0,6$ мкм, в зварному шві на порядок менше – $0,04 \dots 0,08$ мкм, в зоні термічного впливу – $0,3 \dots 0,02$ мкм. У зв'язку зі зменшенням розмірів структурних складових помітно знижується хімічна неоднорідність металу шва (таблиця).

Обрані режими та схема зварювання дозволили обмежити відхилення кристалографічної орієнтації зварного з'єднання від вихідної величиною не більше 7° (рис. 3). Розорієнтація структури металу шва в результаті впливу термодеоформаційного циклу зварювання більш наочно оцінюється за розподілом $Iq_{\perp}$ (рис. 3). Розподіл $Iq_{\perp}$ і його фрагментація згідно [15–19] відповідає формуванню субструктури з багаторівневою спрямованою розорієнтацією металу, що не перевищує 2° дислокаційними межами. Формування багаторівневої структури дозволяє зробити висновок про існування залишкових напружень в зварному шві. Встановлене зміщення піку розподілу $Iq_{\parallel}$ на « θ - 2θ » рентгенограмах (рис. 4)* в сторону мен-

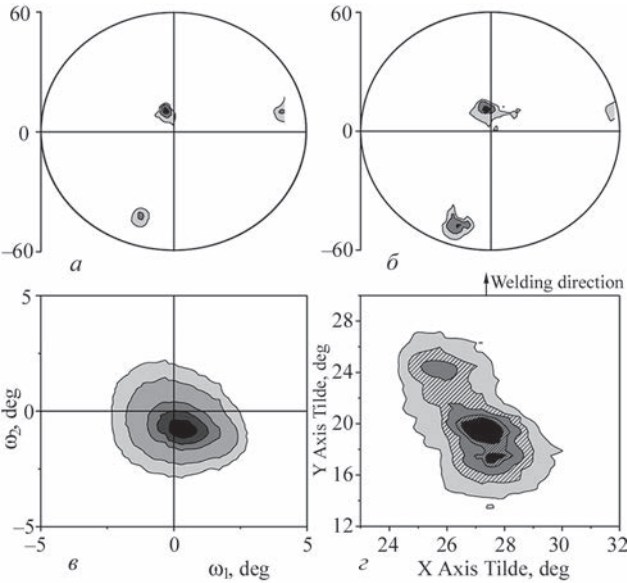


Рис. 3. Полусні фігури $\{220\}$ (а, б) і типовий 2D розподіл $Iq_{\perp}$ $\{220\}$ відображень (в, г) у вихідному ростовому ЖНС монокристалі (а, в) і в зварному шві (б, г). x, y – кутові приладові координати; ω_1 і ω_2 – кутові координати зворотного простору

Дендритна ліквіація $k_d = C_d / C_{m.d}$ основних хімічних компонентів вихідного сплаву ЖС26 та металу шва (k_d – коефіцієнт ліквіації, C_d – концентрація у вісі дендриту, $C_{m.d}$ – концентрація у міждендритному просторі)

Ділянка	Al	Ti	V	Cr	Co	Nb	Mo	W
Вихідний метал	0,7	0,55	1,28	1,98	1,2	0,6	1,6	1,89
Метал шва	0,94	0,7	1,2	1,04	1,02	0,9	1,08	1,24

* В роботі приймала участь О.П. Карасевська (Інститут металофізики ім. Курдюмова НАНУ)

шого кута відображення 2θ вказує на наявність напруг, що розтягують поздовж шва [15–17]. Виконаний з використанням закону Гука та урахуванням зміщення піку $Iq_{\parallel}$ розрахунок показав, що для зварних швів орієнтації (110) вони можуть досягати 397 МПа, а для (111) – 520 МПа.

Особливості руйнування зразків з поперечним розташуванням швів (зварних з'єднань). В узагальненому вигляді результати випробувань зварних зразків на розрив представлені на рис. 5 у вигляді залежності σ_b і $\sigma_{0,2}$ від температури. Умовно їх можна розділити на дві області. Перша область – температура випробування $T_{\text{випр.}} \leq 800^\circ\text{C}$ – характеризується меншою залежністю σ_b і $\sigma_{0,2}$ від температури, більш помітним впливом кристалографічної орієнтації і руйнуванням зразка по основному металу. У другій області – $T_{\text{випр.}} > 800^\circ\text{C}$ – спостерігається інтенсивне зниження значень σ_b і $\sigma_{0,2}$, нівелювання впливу вихідної кристалографічної орієнтації, руйнування зразка відбувається по зварному шву.

Зазначені особливості руйнування зварних з'єднань можуть бути пояснені, виходячи з наступного. Зварні з'єднання представляють собою композит, що складається з ділянок з різною структурою – основний метал, зона термічного впливу, шов. Метал шва завдяки більш ніж на порядок високій дисперсності структурних складових відповідно до закону Холла-Петча [19–21] знаходиться в більш зміцненому стані. Зміцнення також пов'язано зі спостережуваним збільшенням в металі шва щільності незакріплених хаотичних дислокацій (див. рис. 4).

При підвищенні температури випробування до 800°C і більше руйнування переміщується в зону

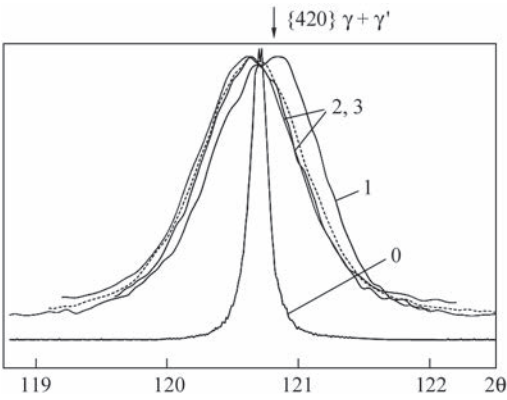


Рис. 4. « θ - 2θ » розподіл $Iq_{\parallel}$ відображень $\{420\}$ у еталоні (0), у вихідному (1) і по вісі зварного шва (2, 3) металу монокристалічного ЖС26

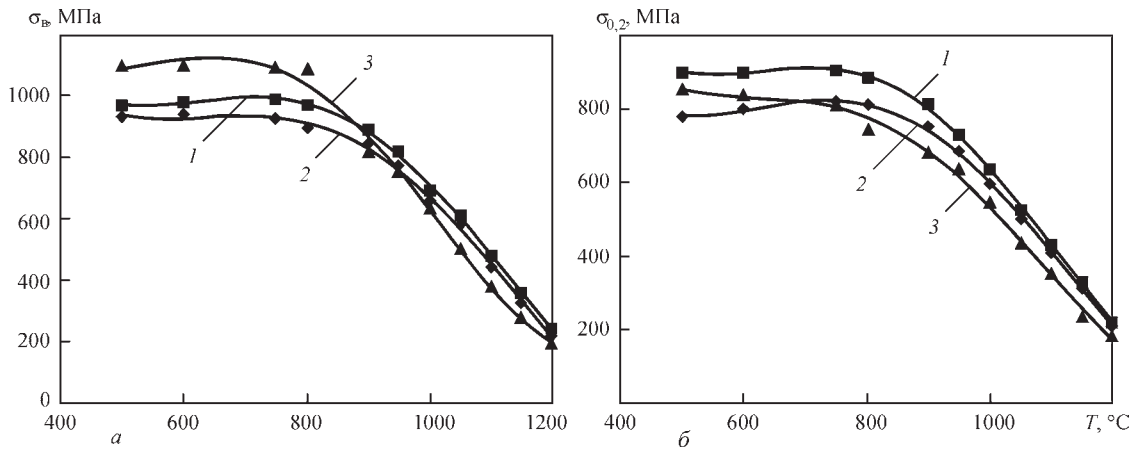


Рис. 5. Залежність межі міцності σ_b (а) і плинності $\sigma_{0.2}$ (б) від температури випробування зварних зразків монокристалів сплаву ЖС26 при поперечному (1, 2) та поздовжньому (3) розміщенні швів. Орієнтація навантаження: $\sim \langle 100 \rangle$ (1, 3) та $\sim \langle 110 \rangle$ (2)

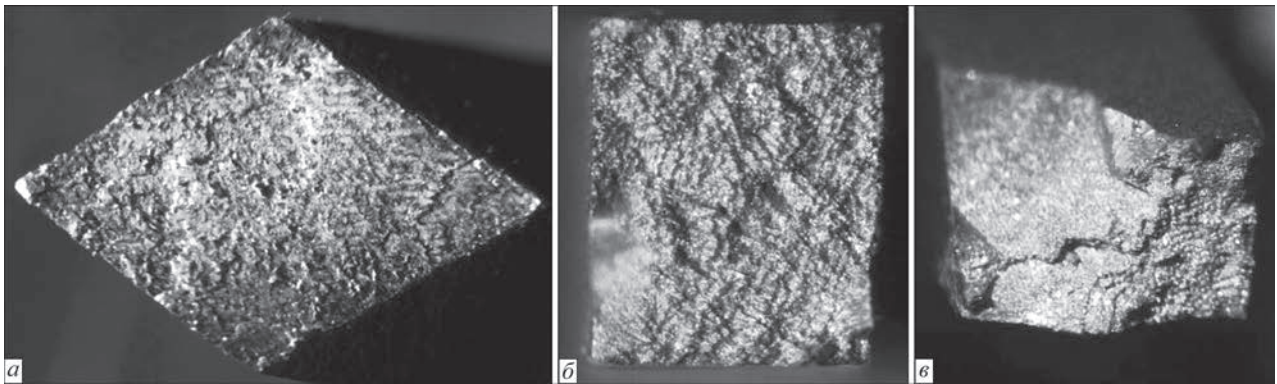


Рис. 6. Зовнішній вигляд зламів зварного з'єднання монокристала сплаву ЖС26 орієнтації близької до $[011]$, після випробувань на одновісне розтягування при температурі: а – 600 °C; б – 1050; в – 900

термічного впливу та шов, внаслідок зменшення зміцнюючого ефекту дрібнодисперсної структури, а також внаслідок підвищення рухливості дефектів [21, 22] на малокутових межах металу шва.

Злами зразків, випробуваних при помірних (≤ 600 °C) температурах характеризуються квазіскольною топографією в поєднанні з наявністю ділянок дрібночарункового відриву зі слабопомітною видовженістю (рис. 6, 7). При підвищенні температури випробування до 800 °C злами набувають змішаного характеру руйнування – поєднання крихкого (30...35 %), квазікрихкого (20...25 %) і в'язкого (45...50 %). Відповідно мікрорельєф поверхні руйнування представлений майданчиками малопластичного зсуву і фасетками квазісколу розміром 50...60 мкм, сходинок 1...20×20...100 мкм з крихким смуговим видом, неглибоких дисперсних ямок (0,5...1,5 мкм) в'язкого руйнування (рис. 7). По мірі наближення до температури 800 °C частка в'язкого руйнування зростає до 50...60 %, злам набуває ямочно-в'язкого характеру, елементи крихкого руйнування поступово замінюються рельєфними ямками, облямованими гребенями відриву. Дослідження бічних поверхонь зразків, зруйнованих в цьому температурному інтервалі (рис. 8), виявили наявність смуг ковзання, рельєфних зсувних ділянок і мікротріщин, що проходять під невеликим

кутом до площини зламу, що ілюструє зсувний характер руйнування по найбільш навантаженим системам ковзання [18, 19, 23].

Руйнування зварних з'єднань в температурному інтервалі 900...1200 °C проходить по шву, відрізняється багатоосередковістю (рис. 9). Злами представлені такими елементами: скольні – розміром ~ 10 ...20 мкм і квазіскольні ~ 8 ...15 мкм

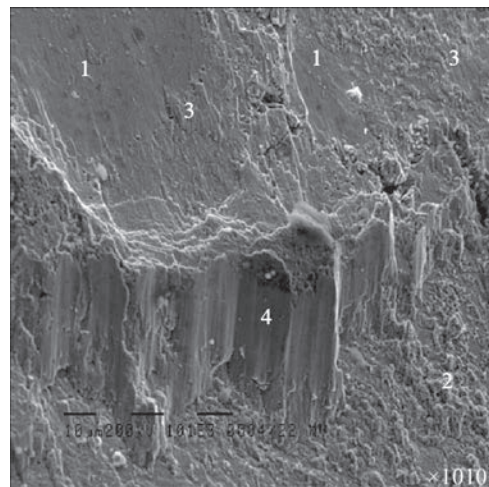


Рис. 7. Фрагмент поверхні руйнування зварного з'єднання. Температура випробування 600 °C (1 – сходинок з крихким смуговим рельєфом; 2 – дисперсні ямки в'язкого руйнування; 3 – фасетки зрушення, ділянки квазікрихкого руйнування; 4 – полосовий рельєф, крихкий характер руйнування, ширина смуг $\Delta_n = 10$...20 мкм)

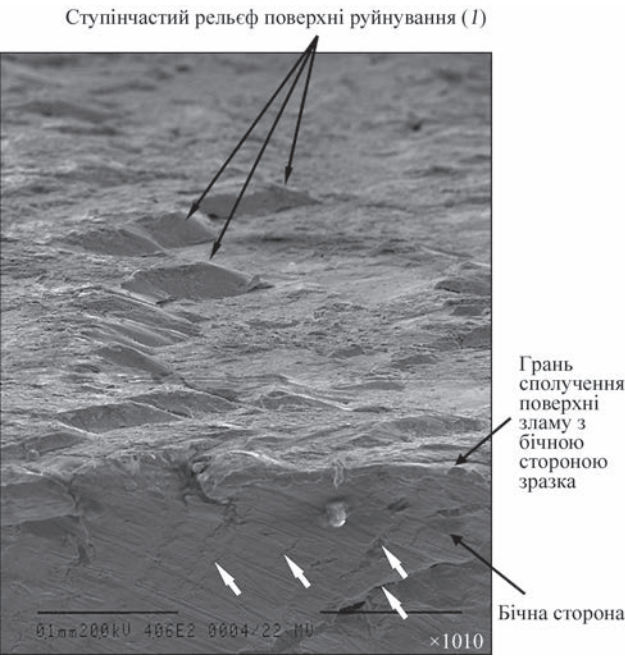


Рис. 8. Сполучення бічної сторони зламів і поверхні руйнування. Світліми стрілками позначені мікротріщини на бічній стороні зразка, утворені за механізмом пластичного зрушення по площинам легкого ковзання $\{111\} \langle 110 \rangle$. Температура випробування 600 °C (1 – сходинки з крихким смуговим рельєфом)

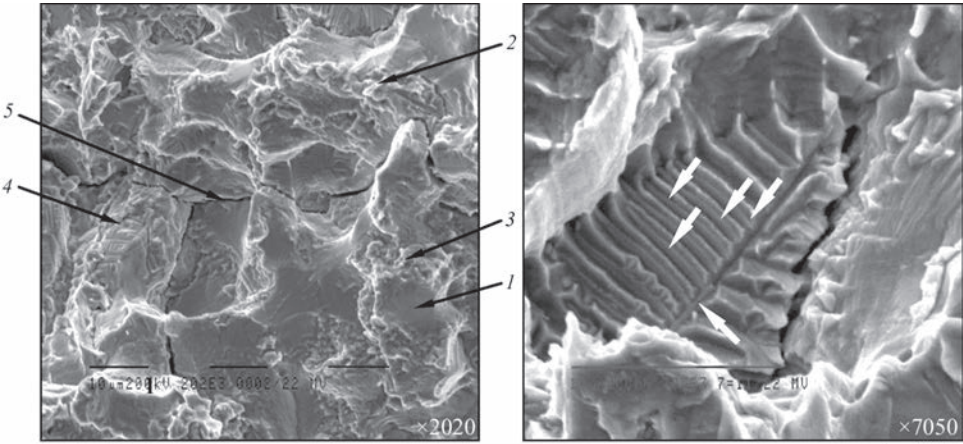
фасетки, фазові виділення карбідного типу ($0,3 \dots 0,4 \times 3,0 \dots 7,0$ мкм) на фасетках відколу, вторинні мікротріщини ($20 \dots 100$ мкм), грубі розшарування ($100 \dots 350$ мкм). Окремі локальні ділянки в'язкої складової ($5 \dots 7$ %) дозволяють судити про

те, що руйнування відбувається з деякою часткою пластичної деформації. Загальний характер руйнування – крихкий ($\sim 90 \dots 93$ %).

Особливості руйнування зразків з поздовжнім розташуванням швів. Руйнування зварних швів при випробуванні з поздовжнім навантаженням в температурному інтервалі 500...600 °C має в'язкий характер з розміром ямок на зламі $\sim 2 \dots 9$ мкм (рис. 10). При збільшенні температури випробування до 800 °C характер руйнування змінюється на змішаний, в зламі поряд з ямками спостерігаються ділянки квазікрихкого руйнування розміром $\sim 3,0 \dots 9,5$ мкм. При подальшому підвищенні температури до 1200 °C змішане руйнування характеризується збільшенням частки квазікрихкої складової, спостерігаються вторинні тріщини (рис. 10), розмір елементів руйнування на поверхні зламів становить $3,5 \dots 10,0$ мкм (1050 °C) і $4,5 \dots 10,5$ мкм (1200 °C), злами успадковують дендритну морфологію мікроструктури зварного шва, структурних дефектів формування, що виникли при кристалізації.

Певна різниця морфології зламів, як і властивостей швів, випробуваних в поздовжньому і поперечному напрямку, пов'язане швидше за все, з різною орієнтацією дендритної структури металу шва по відношенню до напрямку прикладеного навантаження.

Звертає на себе увагу складність і багатоплановість зламів, неоднорідність рельєфу, що відображає різнохарактерність структури і кристалографічної орієнтації окремих ділянок зварних з'єднань.



Елементи	1 Крихке	2 Квазікрихке	3 В'язке	4 ФВ
Al	2,64	2,86	1,92	3,01
Ti	1,66	1,22	1,58	3,77
V	0,35	0,34	0,41	0,45
Cr	4,45	5,63	5,75	4,7
Co	9,31	9,47	9,61	6,92
Ni	69,86	62,72	68,58	50,75
Nb	1,47	1,78	1,75	12,05
Mo	1,67	2,66	2,06	5,3
W	8,6	13,32	8,35	13,05

Рис. 9. Фрагменти поверхні руйнування різних ділянок металу шва при випробуванні зварного з'єднання на одновісне розтягування та вміст хімічних елементів в зламі (мас. %). Температура випробування 1050 °C. Орієнтація зварного з'єднання [100]. 1 – крихке руйнування: розмір фасеток сколу $d_f = 10 \dots 20$ мкм; 2 – квазікрихке руйнування; 3 – локальні ділянки в'язкого руйнування: дисперсні ямки розміром $d_y = 1 \dots 2$ мкм; 4 – фазові виділення (ФВ); 5 – вторинні тріщини $l_{тр} \sim 20 \dots 100$ мкм (світлі стрілки – ФВ)

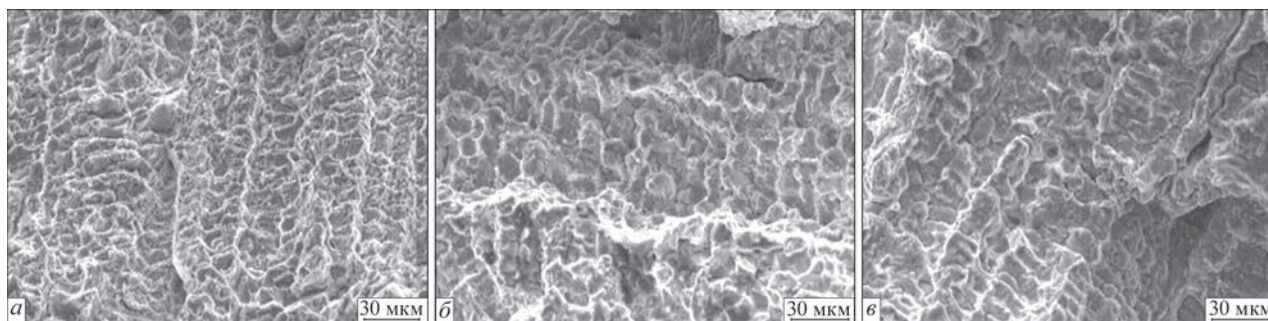


Рис. 10. Фрагменти поверхні руйнування зварного шва монокристалу сплаву ЖС26. Випробування на одновісне розтягування в поздовжньому напрямі при температурах: 600 °C (а), 1050 (б), 1200 (в)

Виходячи з аналізу результатів наведених вище досліджень, особливостей руйнування, механічних властивостей та структури, можна зробити висновок, що встановлена різниця у властивостях і характері деформації та руйнуванні зварних з'єднань монокристалів ЖС26 у високо- та низькотемпературній області в значній мірі визначається характером структурних змін, які відбуваються в результаті зварювання.

Висновки

1. При оцінці особливостей руйнування і властивостей зварних з'єднань нікелевих сплавів слід розглядати їх як композит, що складається з ділянок з різною структурою.

2. В результаті випробування зварних з'єднань на одновісний розтяг в температурному інтервалі 500...1200 °C встановлені дві області руйнування: 500...800 °C – по основному металу та 800...1200 °C – по металу шва.

3. Характер і вид руйнування, властивості зварних з'єднань монокристалів ЖНС, що представляють композицію структурних ділянок, визначаються крім вихідної кристалографічної орієнтації, особливостями структури цих ділянок.

4. Руйнування зварних з'єднань в температурному інтервалі 500...800 °C, зважаючи на більшу міцність шва, які відрізняються більш високою дисперсністю структури, проходить по основному металу. Злам змішаний – крихкий, квазікрихкий, в'язкий. При підвищенні температури випробувань частка елементів крихкого руйнування (по основному металу) зменшується зі збільшенням кількості ямок в'язкого руйнування.

5. Руйнування зварних з'єднань в температурному інтервалі 800...1200 °C в зв'язку зі зменшенням зміцнюючого ефекту дрібнодисперсної структури, розчинення γ' -фази, активації дифузійних процесів і розблокування дислокацій, проходить по зварному шву. Злами відрізняються багатоосередковістю і носять переважно крихкий характер з наявністю локальних вторинних мікротріщин і розшарувань.

6. Вид руйнування зварних швів, випробуваних в поздовжньому напрямку в температурному інтервалі 500...800 °C, характеризується превалюванням в'язкої складової з локальними ділянками квазі-

крихкого руйнування, при 800...1200 °C – руйнування змішане зі збільшенням у міру зростання температури об'ємної частки квазікрихкої складової, наявністю на поверхні зламу вторинних тріщин. Зварні шви на відміну від зварних з'єднань в поперечному напрямку характеризуються більш однорідною структурою по їх довжині.

7. Аналіз властивостей і особливостей руйнування зварних з'єднань дозволяє зробити висновок, що при розробці технології виготовлення зварних конструкцій з монокристалічних ЖНС поряд з урахуванням фізичних і технологічних умов збереження монокристалічної структури слід виходити з необхідності забезпечення однорідності структури і властивостей окремих ділянок з'єднання.

Список літератури

1. Hurada, H. (2003) High temperature materials for gas turbines. The present and future. *Proceeding of the International gas turbine congress-2003, Tokyo, November 2–7*.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. (2007) Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД. *Технология легких сплавов*, 2, 6–16.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. (2011) Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей. *Вестник МГУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 38–52.
4. (2006) *Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия)*. Каблова Е.Н. (ред.). 2-е изд. Москва, Наука.
5. Копелев С.З., Галкин М.Н., Харин А.А., Шевченко И.В. (1993) *Тепловые и гидравлические характеристики охлаждаемых лопаток газовых турбин*. Москва, Машиностроение.
6. Fitzpatrick, G.A., Broughton, T. (1986) «Rolls-Royce Wide Chord Fan Blade» *International Conference on Titanium Products and Applications. San Francisco, California, USA, October 1986*.
7. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2018) Перспективы создания сварных монокристаллических конструкций из жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 11–12, 93–102.
8. Wang, N., Mokadem, S., Rappaz, M., Kurr, W. (2004) Solidification cracking of superalloy single – and bi-crystals. *Acta materialia*, 52, 3137–3182.
9. Park, J.W., Vitec, J.M., Bobu, S.S., David, S.A. (2004) Stray grain formation, thermomechanical stress and solidification cracking single crystal nickel base superalloy welds. *Science and technology of welding and Joining*, 9, 6, 472–482.
10. Anderson, T.D., DuPont, J.N. (2011) Stray grain formation and solidification cracking susceptibility of single crystal Ni-base superalloy CMSX-4. *Welding Journal*, 2, 27–31.
11. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Полищук Е.П. и др. (2008) Склонность к образованию трещин и структурные изменения при ЭЛС монокристаллов жаропрочных никелевых суперсплавов. *Автоматическая сварка*, 2, 10–19.
12. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2013) О природе зерен случайной ориентации в сварных швах моно-

- кристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Металлофизика и новейшие технологии*, 35, **10**, 1347–1357.
13. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гак И.С. и др. (2013) Влияние геометрии сварочной ванны на структуру металла швов монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, **5**, 46–51.
 14. Звягинцева А.В. (2007) *Структурные и фазовые превращения в жаропрочных никелевых сплавах и их роль в образовании трещин в сварных соединениях*: Дис. ... канд. техн. наук. 05.16.01. Киев.
 15. (1961) *Рентгенография в физическом материаловедении*. Багрянский Ю.А. (ред.). Москва, Металлургиздат.
 16. Кривоглаз М.А. (1983) *Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неправильных кристаллах*. Киев, Наукова думка.
 17. Карасевская О.П. (1999) Ориентационный рентгеновский экспериментальный метод фазового анализа. *Металлофизика и новейшие технологии*, 21, 8.
 18. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. (2006) Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода. *Физическая мезомеханика*, 9, **3**, 9–22.
 19. Рыбин В.В. (2002) Закономерности формирования мезоструктур в ходе развитой пластической деформации. *Вопросы материаловедения*, **1**(29), 11–33.
 20. Hall, E.O. (1951) The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results. *Proc. Phys. Soc. B.*, **64**, 747–753.
 21. Petch, N.J. (1953) The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel.*, **174**, 25–28.
 22. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. (1975) *Физические основы прочности тугоплавких металлов*. Киев, Наукова думка.
 23. Jin-lai, Liu et al. (2011) Influence of temperature on tensile behavior and deformation mechanism of Re-containing single crystal superalloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **21**, 1518–1523.
 7. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2018) Prospects of development of welded single-crystal structures of heat-temperature nickel alloys. *The Paton Welding J.*, **11-12**, 83–90.
 8. Wang, N., Mokadem, S., Rappaz, M., Kurr, W. (2004) Solidification cracking of superalloy single- and bi-crystals. *Acta Materialia*, **52**, 3137–3182.
 9. Park, J.W., Vitec, J.M., Bobu, S.S., David, S.A. (2004) Stray grain formation, thermomechanical stress and solidification cracking single crystal nickel base superalloy welds. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **9**(6), 472–482.
 10. Anderson, T.D., DuPont, J.N. (2011) Stray grain formation and solidification cracking susceptibility of single crystal Ni-base superalloy CMSX-4. *Welding J.*, **2**, 27–31.
 11. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Zvyagintseva, A.V. et al. (2008) Sensitivity to cracking and structural changes in EBW of single crystals of heat-resistant nickel alloys. *The Paton Welding J.*, **2**, 6–13.
 12. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2013) On nature of random orientation of grains in welds of single crystals of high-temperature nickel superalloys. *Metallofizika i Novejshe Tekhnologii*, **35**(10), 1347–1357 [in Russian].
 13. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2013) Influence of weld pool geometry on structural changes of metal of welds on high-temperature nickel alloy single crystals. *The Paton Welding J.*, **5**, 45–50.
 14. Zvyagintseva, A.V. (2007) *Structural and phase transformations in high-temperature nickel alloys and their role in formation of cracks in welded joints*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tekh. Sci. Degree. Kiev [in Russian].
 15. (1961) *Radiography in physical materials science*. Ed. by Yu.A. Bagryansky. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
 16. Krivoglaз, M.A. (1983) *Diffraction of X-ray beams and neutrons in abnormal crystals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
 17. Karasevskaya, O.P. (1999) Orientation X-ray experimental method of phase analysis. *Metallofizika i Novejshe Tekhnologii*, **21**, **8** [in Russian].
 18. Panin, V.E., Egorushkin, V.E., Panin, A.V. (2006) Physical mesomechanics of deformable solid body as the multilevel system. I: Basic physics of multilevel approach. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, **9**(3), 9–22 [in Russian].
 19. Rybin, V.V. (2002) Fundamentals of formation of mesostructures during developed plastic deformation. *Voprosy Materialovedeniya*, **1**(29), 11–33 [in Russian].
 20. Hall, E.O. (1951) The deformation and ageing of mild steel. III: Discussion of results. *Proc. Phys. Soc. B.*, **64**, 747–753.
 21. Petch, N.J. (1953) The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel.*, **174**, 25–28.
 22. Trefilov, V.I., Milman, Yu.V., Firstov, S.A. (1975) *Basic physics of strength of refractory metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
 23. Jin-lai, Liu et al. (2011) Influence of temperature on tensile behavior and deformation mechanism of Re-containing single crystal superalloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **21**, 1518–1523.

References

DESTRUCTION OF WELDED JOINTS OF SINGLE-CRYSTAL HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOYS

K.A. Yushchenko, B.O. Zaderyi, I.S. Gakh, G.V. Zviagintseva, T.O. Aleksijenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Mechanical properties were determined and features of destruction of welded joints on single-crystals of high-temperature nickel alloys at tensile testing in the range of temperatures close to working temperatures were studied. Two characteristic temperature ranges of destruction were found: 500...800, 800...1200 °C. In the first temperature range welded sample destruction occurs in the base metal at mixed fracture mode: brittle, quasibrittle and ductile. In the second range destruction runs in the weld metal, fracture is multicenter, predominantly brittle with presence of secondary cracks. The considered features are related, mainly, to changes of the initial structure of the single-crystal, as a result of solidification and at cooling of the weld metal. These mainly are formation of a multilevel substructure, refinement of dendrites, γ - and γ' -phases, eutectic formations and carbides at reduction of dendrite liquation of the weld metal. 23 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: single-crystal, high-temperature nickel alloys, welded joint, weld, tensile testing, temperature ranges of destruction, destruction features, microstructure

Надійшла до редакції 02.12.2021

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ ВИСОКОШВИДКІСНИМ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИМ НАПИЛЕННЯМ КЕРМЕТНОГО ПОРОШКУ НА ОСНОВІ СПЛАВУ FeMoNiCrB, ЩО АМОРФІЗУЄТЬСЯ

Ю.С. Борисов, Н.В. Вігілянська, І.А. Дем'янов, А.П. Мурашов, О.П. Грищенко

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

Досліджено процес отримання методом високошвидкісного газополуменевого напилення композиційних порошків на основі Fe-сплаву, що аморфізується, з добавками тугоплавких сполук. Для напилення використовували композиційні порошки FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C, FeMoNiCrB-ZrB₂, отримані з суміші порошків композицій методом механічного легування в планетарному млині. В результаті напилення отримані щільні покриття (пористість менше 3 %), які сформовані з частково деформованих частинок, з багатофазною структурою та рівномірним розподілом структурних складових. Результати рентгеноструктурного фазового аналізу свідчать про формування аморфно-кристалічної структури в отриманих композиційних покриттях. На рентгенограмах максимальний за амплітудою пік від кристалічної фази на тлі аморфного гало відповідає фазі TiCN у покритті FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та фазі ZrB₂ у покритті FeMoNiCrB-ZrB₂. Розмір вимірної мікротвердості становить для композиційного покриття FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C – 5,5±0,25 ГПа, для покриття FeMoNiCrB-ZrB₂ – 5,9±0,29 ГПа. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: високошвидкісне газополуменеве напилення, аморфна фаза, аморфний сплав на основі заліза, композиційний порошок, композиційне покриття, мікроструктура, мікротвердість

Вступ. Аморфні металеві матеріали на основі заліза знаходять широке застосування в промисловості завдяки своїм перевагам, таким як висока міцність та твердість, чудова корозійна та зносостійкість, хороші магнітні властивості, а також відносно низька вартість матеріалу [1–3]. Однак недоліком аморфних компактних матеріалів є їх низька пластичність та надмірна крихкість при кімнатній температурі, а також невисока продуктивність обладнання та високі витрати на виробництво, що суттєво обмежує їхнє практичне застосування в якості конструкційних матеріалів [4]. Для усунення цих недоліків матеріали на основі аморфних сплавів використовуються на поверхні виробів у вигляді захисних покриттів, які отримують методами газотермічного напилення. Підставою для науково-практичного інтересу використання аморфних покриттів на основі заліза та аморфних композиційних покриттів для підвищення стійкості поверхні виробів є швидкість охолодження при газотермічному напиленні частинок розплаву порошку, що напилюється, яка становить 10⁵...10⁶ К/с і є достатньою для аморфізації матеріалу покриття. Крім того, аморфні металеві покриття можуть наноситися на великогабаритні та складні деталі, що дозволяє розширювати сфери їх практичного застосування.

Для нанесення покриттів зі сплавів на основі заліза, що аморфізуються, використовують методи плазмового, детонаційного, електродугового, високошвидкісного газополуменевого (HVOF, HVAF) напилення. Покриття, що одержуються, застосовуються для підвищення корозійної стійкості контейнерів для зберігання та транспортування відпрацьованого ядерного палива в якості альтернативної заміни дорогих нікелевих і титанових сплавів [5]; на деталях, що працюють в умовах корозії, корозії-ерозії та абразивного зношування для заміни гальванічного хромування [6, 7]; на деталях пересувних складів [8]; для зміцнення та відновлення труб промислових котлів, що працюють в умовах високотемпературного ерозійного зношування [9]. Процес високошвидкісного газополуменевого напилення (ВШГПН) найбільш широко використовується для отримання покриттів з аморфною структурою через використання при цьому методі відносно невисокої температури та високої швидкості струменя, внаслідок чого формуються покриття з високою щільністю та міцністю зчеплення з основою.

Поряд із використанням сплавів на основі заліза ведуться розробки композиційних покриттів з аморфною матрицею, яка зміцнена другою фазою. В якості зміцнюючих добавок використову-

Борисов Ю.С. – <https://orcid.org/0000-0002-6019-8464>, Вігілянська Н.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-2095>, Дем'янов І.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4536-9971>, Мурашов А.П. – <https://orcid.org/0000-0002-0357-9068>, Грищенко О.П. – <https://orcid.org/0000-0003-2640-8656>

© Ю.С. Борисов, Н.В. Вігілянська, І.А. Дем'янов, А.П. Мурашов, О.П. Грищенко, 2022

Таблиця 1. Характеристика порошків для газополуменевого напilenня покриттів

Склад, мас. %	Розмір частинок, мкм	Метод отримання
FeMoNiCrB (36,2Fe–29,9Mo–23,6Ni–7,6Cr–2,7B)	<40	Розпилення розплаву азотом
77 FeMoNiCrB – – 23 (Ti, Cr)C	<40	МЛ в ПМ 1,5 год
75 FeMoNiCrB – – 25 ZrB ₂	<80	МЛ в ПМ 1,5 год

ють нітриди TiN, карбіди B₄C, WC, борида CrB₂, оксиди Al₂O₃, а також нержавіючі сталі, NiCr та ін. [10–14]. Ці композиційні покриття показують значне підвищення твердості, зносостійкості та корозійної стійкості порівняно з базовим аналогом.

У цій роботі проведено дослідження формування структури та фазового складу композиційних покриттів, отриманих методом ВШГПН, на основі

Fe-сплаву, що аморфізується, зі зміцнюючими добавками тугоплавких сполук (Ti, Cr)C, ZrB₂.

Матеріали та методики досліджень. Для ВШГПН покриттів з аморфною структурою використовували порошки на базі аморфного сплаву FeMoNiCrB, отриманих методом механічного легування (МЛ) в планетарному млині (ПМ) [15]. Характеристики порошків наведено у табл. 1.

Напilenня проводили на установці (ВШГПН) УВШГПН-М1 при наступних технологічних параметрах процесу: тиск пропан-бутану – 4 атм, тиск кисню – 7 атм, тиск повітря – 6 атм, тиск азоту – 5 атм, дистанція напilenня 120 мм. Покриття FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB-ZrB₂ наносили на підшар NiCr (товщина 50...100 мкм), який був напилений електродуговим методом (діаметром дроту 2 мм).

При проведенні металографічних досліджень застосовували оптичний мікроскоп Neophot-32 із пристроєм для цифрового фотографуван-

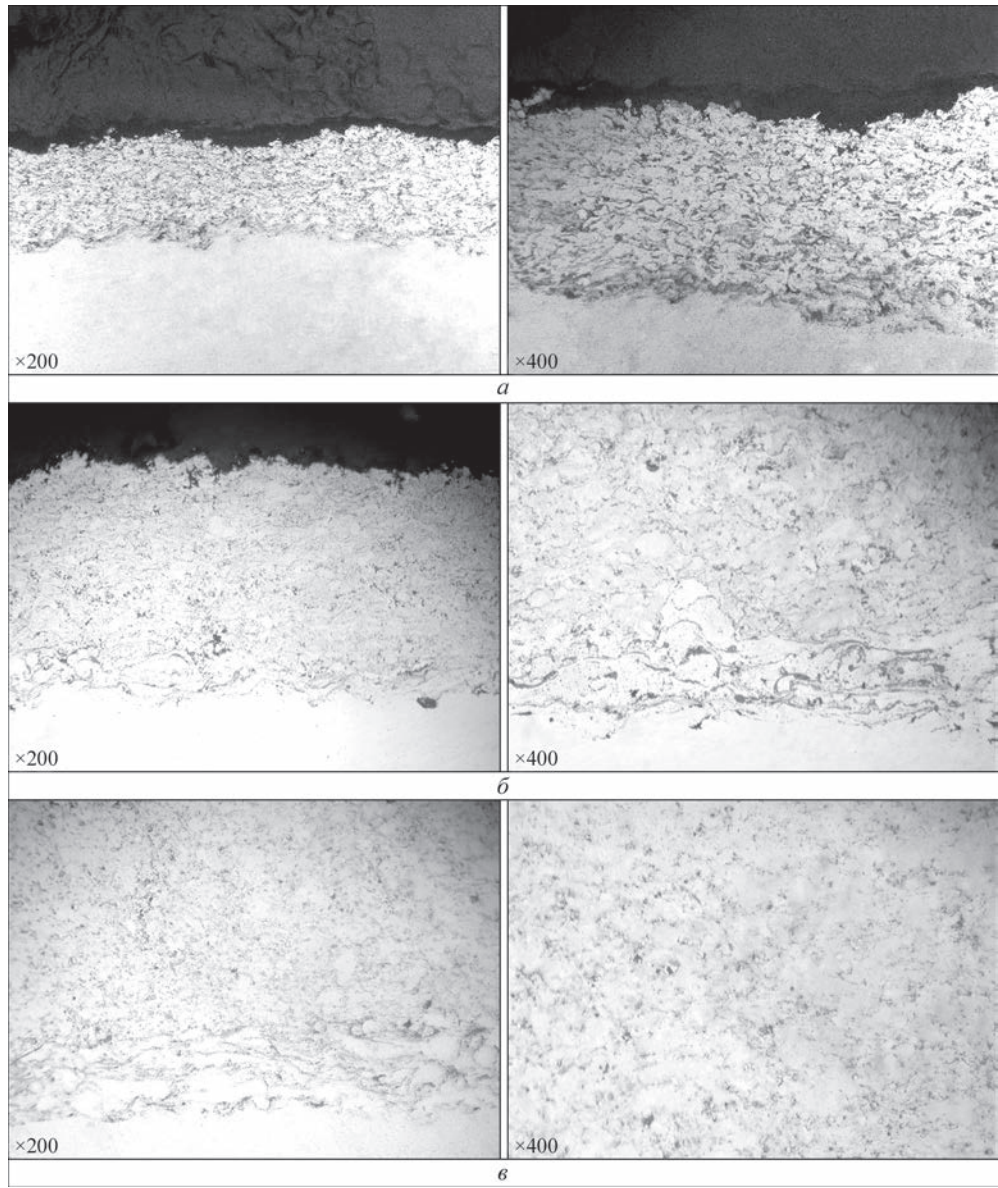


Рис. 1. Мікроструктура ВШГПН-покриттів: а – FeMoNiCrB; б – FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C; в – FeMoNiCrB-ZrB₂

ня; вимірювання мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3. Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) покриттів проводили на установці ДРОН-УМ-1, випромінювання CuK_α , монохроматизоване.

Результати досліджень. Металографічним аналізом встановлено, що одержані покриття з усіх досліджуваних матеріалів мають щільну, дрібнозернисту, однорідну по всій площі структуру, яка сформована з частково деформованих сферичних частинок (рис. 1). Пористість покриттів не перевищує 3 об. %; покриття $\text{FeMoNiCrB}-(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$ та FeMoNiCrB-ZrB_2 щільно прилягають до підшару ніхрому, покриття FeMoNiCrB – до сталевій основі.

Вимірювання мікротвердості ВШГПН-покриттів (рис. 2) показало, що застосування зміцнюючих добавок $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$ та ZrB_2 призводить до підвищення на 1120 і 1490 МПа мікротвердості композиційних покриттів порівняно з покриттям вихідного порошку FeMoNiCrB .

Рентгеноструктурним аналізом встановлено (рис. 3), що у досліджуваних ВШГПН-покриттях присутня аморфна фаза (АФ).

Дані РСФА свідчать, що внаслідок ВШГПН порошків на основі сплаву FeMoNiCrB отримані багатофазні покриття, що мають аморфно-кристалічну структуру. Усі покриття мають додаткові кристалічні піки на тлі гало від аморфної фази. На рентгенограмах максимальний пік по амплітуді від кристалічної фази на тлі аморфного гало відповідає фазам Fe_2B і FeCr у покритті FeMoNiCrB ; $\text{TiC}_{0.3}\text{N}_{0.7}$ у покритті $\text{FeMoNiCrB}-(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$ та фази ZrB_2 у покритті FeMoNiCrB-ZrB_2 . У всіх покрит-

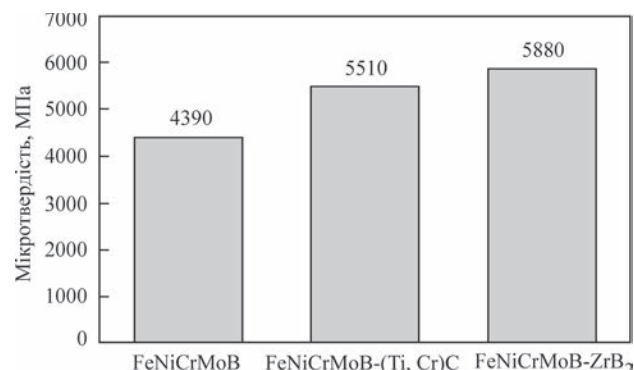


Рис. 2. Мікротвердість покриттів з аморфізованою структурою, отриманих методом ВШГПН

Таблиця 2. Результати досліджень ВШГПН-покриттів на основі сплаву FeMoNiCrB

Матеріал покриття	Товщина, мкм	Мікротвердість $HV_{0.05}$, МПа	Фазовий склад
FeMoNiCrB	200...250	4390±290	АФ; Mo_2FeB_2 ; Fe_2B ; FeCr ; Fe_3O_4 ; Cr_7Ni_3
$\text{FeMoNiCrB}-(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$	300...350	5510±250	АФ; Fe_2Ti ; Cr_7Ni_3 ; $\text{TiC}_{0.3}\text{N}_{0.7}$; $\text{TiC}_{0.2}\text{N}_{0.8}$; $\text{Fe}_{15.1}\text{C}$; Ni_3Fe ; фази в малій кількості: Ni_3C ; MoC ; FeMoO_4 ; FeO ; FeC_8
FeMoNiCrB-ZrB_2	900..950	5880±290	АФ; ZrB_2 ; Fe ; (Fe, Ni) тв. р-н; Cr_7Ni_3 ; MoNi_4 ; Ni_2Zr ; фази в малій кількості: ZrO_2 ; Fe_2B ; Ni_2B ; MoB_2 ; FeO ; $\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_{2.6}\text{O}_4$

тях зафіксована інтерметалідна фаза Cr_7Ni_3 , яка має тетрагональну кристалічну структуру. Залізо як основний елемент вихідного сплаву, присутній в покриттях у вигляді оксидів (Fe_3O_4 , FeO , FeMoO_4 , $\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_{2.6}\text{O}_4$), боридів (Mo_2FeB_2 , Fe_2B), інтерметалідів (FeCr , Fe_2Ti , Ni_3Fe), карбідів ($\text{Fe}_{15.1}\text{C}$, FeC_8) та (Fe, Ni) -твердому розчині. У покритті FeMoNiCrB-ZrB_2 виявлено також залізо в чистому вигляді.

Зведені результати дослідження ВШГПН-покриттів на основі сплаву FeMoNiCrB наведено у табл. 2.

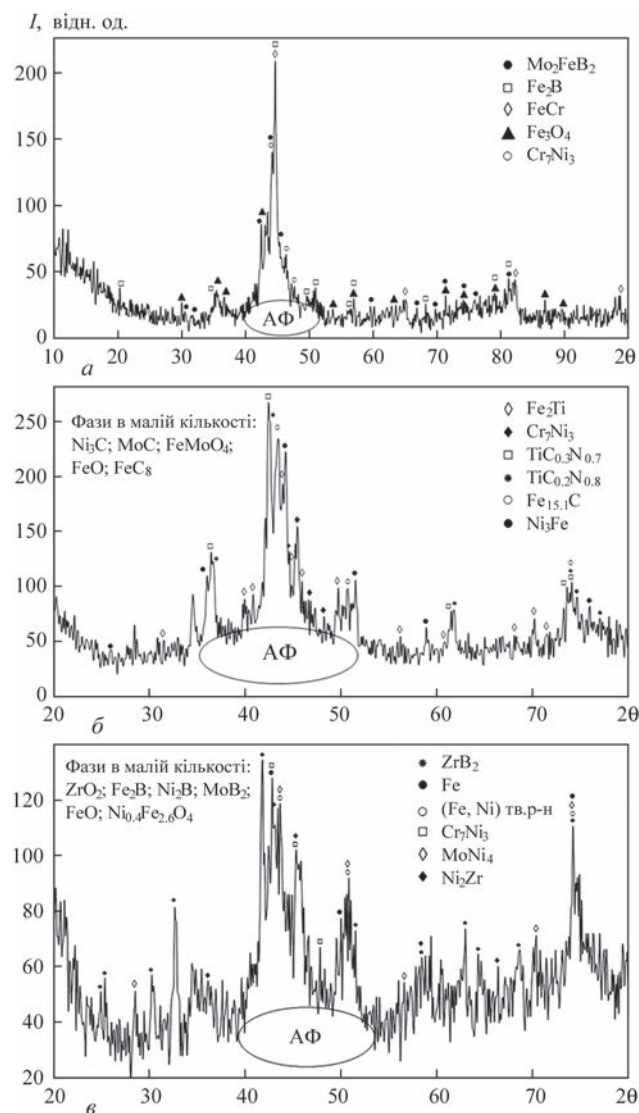


Рис. 3. Рентгенограми ВШГПН-покриттів: а – FeMoNiCrB ; б – $\text{FeMoNiCrB}-(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$; в – FeMoNiCrB-ZrB_2

Висновки

Методом високошвидкісного газополуменового наплення з використанням композиційних порошків, отриманих методом механічного легування, на базі Fe-сплаву, що аморфізується, отримані покриття FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB-ZrB₂ з аморфно-кристалічною структурою.

Отримані покриття характеризуються рівномірним розподілом структурних складових, мають однорідну по всій площі структуру, яка сформована з частково деформованих сферичних частинок. Пористість покриттів не перевищує 3 %.

Встановлено, що наявність зміцнюючих компонентів (Ti, Cr)C, ZrB₂ призводить до підвищення мікротвердості покриттів, порівняно з покриттям вихідного порошку FeMoNiCrB, на 1120 і 1490 МПа відповідно.

Список літератури/References

- Kim, S.W., Namkung, J., Kwon, O. (2012). Manufacture and Industrial Application of Fe-Based Metallic Glasses. *Materials Science Forum*, 706-709, 1324–1330. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.706-709.1324>
- Yuting, D., Guofeng, M. (2020). Research Progress of Fe-based Amorphous/Nanocrystalline Alloys. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 565, 012048. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012048>
- Li, H.X., Lu, Z.C., Wang, S.L. et al. (2019) Fe-based bulk metallic glasses: glass formation, fabrication, properties and applications. *Progress in Materials Science*, 103, 235–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.01.003>
- Guo, S.F., Liu, L., Li, N., Li, Y. (2010) Fe-based bulk metallic glass matrix composite with large plasticity. *Scripta Materialia*, 62(6), 329–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.10.024>
- Blink, J., Farmer, J., Choi, J., Saw, C. (2009) Applications in the Nuclear Industry for Thermal Spray Amorphous Metal and Ceramic Coatings. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40, 1344–1354. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9830-4>
- Branagan, D.J., et al. (2006) Wear and Corrosion Resistant Amorphous/Nanostructured Steel Coatings for Replacement of Electrolytic Hard Chromium, ITSC. In: Marple B. (ed.) *Proc. of the 2006 ITSC, ASM International, Materials Park, OH*.
- Lu, W., Wu, Y., Zhang, J. et al. (2010) Microstructure and Corrosion Resistance of Plasma Sprayed Fe-Based Alloy Coating as an Alternative to Hard Chromium. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20(5), 1063–1070. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9611-z>
- Артемчук В.В., Астахов Є.А. (2012) Структура та властивості аморфних відновлювальних покриттів на основі заліза. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, 26, 10–15.
- Artemchuk, V.V., Astakhov, E.A. (2012) Structure and properties of amorphous renewable iron-based coatings. *Visnyk NTU KhPI. Series: New Solutions in Modern Technologies*, 26, 10–15 [in Ukrainian].
- Cheng, J.B., Liang, X.B., Chen, Y.X. et al. (2012) High-Temperature Erosion Resistance of FeBSiNb Amorphous Coatings Deposited by Arc Spraying for Boiler Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22(5), 820–827. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9876-5>
- Yugeswaran, S., Kobayashi, A., Suresh, K., Subramanian, B. (2013) Characterization of gas tunnel type plasma sprayed TiN reinforced Fe-based metallic glass coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 551, 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.09.111>
- Yoon, S., Kim, J., Kim, B.D., Lee, C. (2010) Tribological behavior of B4C reinforced Fe-base bulk metallic glass composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 1962–1968. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.07>
- Yasir, M., Zhang, C., Wang, W. et al. (2015) Wear behaviors of Fe-based amorphous composite coatings reinforced by Al₂O₃ particles in air and in NaCl solution. *Materials & Design*, 88, 207–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.142>
- Lampke, T., Wielage, B., Pokhmurska, H. et al. (2011) Development of particle-reinforced nanostructured iron-based composite alloys for thermal spraying. *Surface and Coatings Technology*, 205(12), 3671–3676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.01.00>
- Wang, S., Cheng, J., Yi, S.-H., Ke, L. (2014) Corrosion resistance of Fe-based amorphous metallic matrix coating fabricated by HVOF thermal spraying. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(1), 146–151. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(14\)63040-5](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(14)63040-5)
- Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Бурлаченко О.М. та ін. (2021) Композиційні порошки на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з добавками тугоплавких сполук для газотермічного нанесення покриттів. *Автоматичне зварювання*, 11, 44–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.08>
- Borysov, Yu.S., Borysova, A.L., Burlachenko, O.M. et al. (2021) Composite powders based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with additives of refractory compounds for thermal spraying of coatings. *The Paton Welding J.*, 11, 38-47. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.08>

STUDIES OF COATINGS PRODUCED BY HIGH-VELOCITY OXYFUEL SPRAYING USING CERMET POWDER BASED ON FeMoNiCrB AMORPHIZING ALLOY

Yu.S. Borisov, N.V. Vihilianska, I.A. Demianov, A.P. Murashov, O.P. Grishchenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The process of producing composite powders based on amorphizing Fe-alloy with the additives of refractory compounds by the method of high-velocity oxyfuel spraying was investigated. For spraying composite powders FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C, FeMoNiCrB-ZrB₂ were used, produced from a mixture of powders of the compositions by mechanical alloying in a planetary mill. As a result of spraying, dense coatings (porosity is less than 3%) were produced, which were formed from partially deformed particles with a multiphase structure and a uniform distribution of structural components. The results of X-ray diffraction phase analysis indicate the formation of amorphous-crystalline structure in the produced composite coatings. On the radiographic patterns, the maximum peak amplitude from the crystalline phase against the background of the amorphous halo corresponds to the TiCN phase in the coating FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C and the ZrB₂ phase in the FeMoNiCrB-ZrB₂ coating. The size of the measured microhardness for the composite coating FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C amounts to – 5.5 ± 0.25 GPa, and for the coating FeMoNiCrB-ZrB₂ it is 5.9 ± 0.29 GPa. 15 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: high-velocity oxyfuel spraying, amorphous phase, amorphous iron-based alloy, composite powder, composite coating, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 22.11.2021

ВИБІР ЗНОСОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ ГІРНИЧОЇ ТЕХНІКИ

А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.О. Жданов

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

Розглянуто умови експлуатації деталей та вузлів обладнання гірничої техніки, що виготовляються в основному зі сталі 110Г13Л. Відзначено обмежені можливості застосування цієї сталі для підвищення довговічності устаткування. Як альтернатива показана можливість застосування електрошлакового наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі різними високовуглецевими матеріалами. Найбільш перспективним матеріалом для наплавлення слід вважати високохромистий чавун, що мають хороше поєднання підвищених механічних властивостей та опір абразивному та ударно-абразивному зношуванню. Бібліогр. 24, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: деталі обладнання гірської техніки, зношування, електрошлакова наплавка, струмопідвідний кристалізатор, сталь 110Г13Л, високохромистий чавун, швидкорізальна сталь

Більшість машин та механізмів гірничо-металургійного комплексу експлуатуються в жорстких умовах абразивного та ударно-абразивного зношування, а в ряді випадків і складного термонапруженого стану. Такі умови експлуатації призводять до підвищеного зношування робочих поверхонь, відповідальних за працездатність всього виробу деталей.

Відомо, що одним із способів підвищення довговічності зношуваних деталей є зносостійке наплавлення, а в разі нанесення наплавленого металу великої товщини переважно використовувати електрошлакове наплавлення (ЕШН), зокрема, ЕШН в струмопідвідному кристалізаторі (СПК), що дозволяє в широких межах регулювати теплові умови кристалізації наплавленого металу у вигляді сталей та сплавів різного класу.

Метою даної роботи є обговорення існуючих підходів до вибору технології зміцнення вузлів та деталей обладнання гірничої техніки, а також вибору матеріалів для електрошлакового відновлювального наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі.

Аналіз технологій та їх обговорення. Традиційно склалося так, що найбільш прийнятним матеріалом для виготовлення виробів і деталей (або футеровок до них) обладнання гірничої техніки є сталь 110Г13Л. Практично всі унікальні вироби великих розмірів (ковші екскаваторів, черпаки драг тощо) або масового виробництва (біла, молотки тощо) виготовляють з цієї сталі [1, 2].

Часто при прийнятті рішення про використання цієї сталі з метою підвищення працездатності виробів, що експлуатуються в умовах абразивно-

го зношування, не враховують її структурні особливості, що дозволяють домогтися позитивних результатів лише у випадку, якщо абразивне зношування супроводжується ударними навантаженнями. Встановлено, що за відсутності ударів сталь 110Г13Л не має відчутних переваг у порівнянні зі сталлю 40 [3]. Такий вплив ударних навантажень на підвищення як твердості сталі, так і її зносостійкості найчастіше пояснюють мартенситним деформаційним перетворенням (наклепом) [4]. Хоча існують інші пояснення структурних змін у цій сталі в умовах зовнішнього ударного впливу, пов'язані з процесами, що відбуваються в тонкій кристалічній структурі (дроблення мозаїчних блоків та виникнення мікронапруг) або при поєднанні протікання обох структурних процесів [5, 6].

У практичному плані можна стверджувати, що сталь 110Г13Л тим більше буде виявляти свої зносостійкі якості, чим при більших навантаженнях вона буде експлуатуватися, хоча ступінь її зміцнення (підвищення твердості) при значному зростанні навантажень знижується [7, 8].

Слід також зазначити, що глибина зміцненого шару при експлуатації виробів різного призначення в умовах ударно-абразивного зношування відносно невелика. Відомо [9], наприклад, що поверхні навіть повністю зношеного зуба ковшів екскаваторів ЕКГ-4 на глибині до 1 мм мають твердість, що не перевищує *HB* 375, а на глибині 3 мм – понад *HB* 285. Зі збільшенням глибини шару вона наближається до показника твердості металу у вихідному стані, що і обумовлює загалом низьку зносостійкість зубів зі сталі 110Г13Л. Аналогічна оцінка отримана і за результатами екс-

плуатації щік щокрової дробарки ЛД-58Б: глибина зміцненого шару складала 2,5...2,7 мм [7].

Одним із способів підвищення зносостійкості сталі є її зміцнення за рахунок виконання попереднього наклепу робочої поверхні виробу до його експлуатації. Найбільш ефективним способом такого зміцнення є обробка робочої поверхні енергією вибуху. Глибина такого зміцнення не перевищує 2 мм [10].

Проте зносостійкість деталей гірських машин, навіть зміцнених цим способом, залежить від міцності шматків перероблюваної гірничої маси (табл. 1) [11].

Сучасні схеми зміцнення вибухом дозволяють забезпечити поверхневу жорсткість після зміцнення порядку $HV\ 380\ldots420$. Отже, ті деталі, які під час роботи отримують наклеп більше, ніж глибина зміцнення під час вибуху, зміцнювати вибухом недоцільно [11].

Вже при перших спробах оцінки впливу електрошлакового процесу на властивості сталі 110Г13Л була відзначена можливість поліпшення пластичності сталі [12].

Встановлено [13], що при ЕШН в СПК стружкою сталі 110Г13Л, при дотриманні оптимального співвідношення електричної енергії, що вводиться в шлакову ванну, та масової швидкості подачі присадки, можна забезпечити не тільки мінімальне проплавлення основного металу (сталь Ст3), але і досягти формування дрібнозернистої структури з відносно невеликим розміром осередків – 40...60 мкм. А як показали дослідження, виконані в роботі [14], при подрібненні зерна в цій сталі підвищується міцність, пластичність, ударна в'язкість, інтенсивність наклепу, абразивна стійкість при ударному навантаженні.

Таким чином, наплавлення в СПК сталлю 110Г13Л виконувати можна, але будь-які відхилення від оптимальної технології наплавлення мо-

жуть призводити до формування в зоні сплавлення крихких структурних складових і, як наслідок, дефектів у вигляді тріщин.

Матеріали для наплавлення. Найбільш ефективним наплавним матеріалом для деталей обладнання гірничої техніки можуть бути перш за все високохромисті чавуни, що містять приблизно від 15 до 30 % хрому, які знайшли широке застосування в ливарній практиці, а також при електрошлаковій наплавці в СПК виробів металургійного виробництва, зокрема, прокатних валків [15].

Таке широке застосування чавунів цього типу пов'язано з особливостями їх структури. Зі збільшенням вмісту хрому в структурі, поряд з цементитом (Fe_3C) створюється тригональний карбід хрому типу $(Cr, Fe)_7C_3$, що розчиняє від 30 до 50 % заліза [16]. При вмісті хрому понад 14 % утворюються лише спеціальні карбіди. При подальшому збільшенні хрому замість тригонального утворюється кубічний карбід хрому $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Карбіди хрому, що формуються, мають підвищену мікротвердість. За даними К. Реріга вона становить $HV\ 12000\ldots16000$ МПа для карбідів типу M_7C_3 [17] і приблизно $HV\ 14000$ МПа для $M_{23}C_6$ [18], тоді як твердість цементиту білих чавунів не перевищує $HV\ 8400\ldots10000$ МПа.

Крім змін у складі карбідної фази чавуну, змінюється і морфологія евтектичної складової. Крихкий ледебурит, властивий звичайним білим чавунам, замінюється міцнішою хромистокарбідною евтектикою [19, 20]. Схематичне зображення будови ледебуриту та хромистокарбідної евтектики за К.П. Буніним представлено на рисунку.

Слід зазначити ще одну особливість високохромистих чавунів – вони, як і сталь 110Г13Л, можуть зміцнюватися під впливом ударних навантажень. Хоча вже на початку литі чавуни цього типу мають підвищену твердість ($\sim HRC\ 50$), яка, як мінімум, не знижується в процесі експлуатації.

Таблиця 1. Зносостійкість зміцнених вибухом деталей гірських машин за різної міцності шматків гірської маси

Міцність шматків гірської маси за шкалою М.М. Протодіяконова	Збільшення зносостійкості, %	
	зубів ковшів екскаваторів ЕКГ-4, ЕКГ-8	броней конусних дробарок КМД та КСД
6...8	55	65
10...12	30	44
14...16	15	23
18...20	0	5

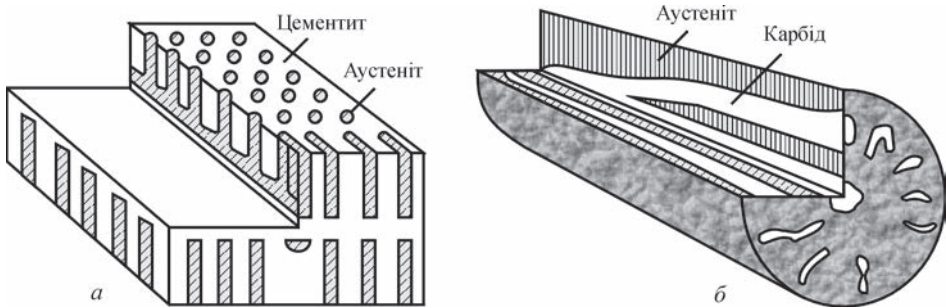


Рис. 1. Схематичне зображення структури ледебуриту (а) та хромистокарбідної евтектики (б)

Таблиця 2. Механічні властивості та твердість сталі 110Г13Л та високохромистого чавуну (~3 % С, 16 % Cr)

Марка матеріалу	Механічні властивості							Твердість <i>HB</i> (<i>HRC</i>)	Джерело
	σ_b , МПа	σ_T , МПа	Ψ , %	δ , %	KCU , МДж/м ²	$\sigma_{\text{вип.}}$, МПа	Стріла прогину, мм		
110Г13Л (після лиття)	400...500	300...450	—	0,5...5	0,1...0,3	—	—	200...230	[21]
110Г13Л (після закалювання)	560...1000	250...400	35...45	40...50	1,2...2,2	—	—	170...230 (< 18...22)	[10] [21] [22]
110Г13Л (після впливу ударних навантажень)	~1000	~ 830	23...27	15...19	1,4...1,7	—	—	250...325 (24...33)	[10]
Наплавлений високохромистий чавун (ЕШН)	600	—	—	—	1,3	1270	2,3	(~ 50)	[23]
Литий високохромистий чавун	420	—	—	—	—	280	1,7	(~ 50)	

За міцнісними характеристиками наплавлений електрошлаковим способом високохромистий чавун відповідає характеристикам сталі 110Г13Л та істотно перевищує характеристики литого зносостійкого чавуну аналогічного складу (табл. 2).

До потенційно можливих для застосування при ЕШН в СПК деталей гірничого обладнання можна віднести і високолеговані швидкорізальні сталі.

Досвід експлуатації валків листового стану 1700, наплавлених в СПК рідкою присадкою сталі типу 200Х5М5Ф5В5, дозволили отримати підвищення їх стійкості в 4,0...4,5 рази в порівнянні зі стійкістю стандартних чавунних валків з вибіленим робочим шаром [24].

Слід зазначити наступне. Мабуть, такого типу матеріали все ж таки вимагають експлуатації більшою мірою в умовах абразивного зношування, ніж ударно-абразивного. Тому для них слід знаходити відповідні області застосування. Крім того, як видно з хімічного складу сталей цього типу, у кожному окремому випадку необхідно оцінювати економічну доцільність їхнього застосування.

Висновки

1. Електрошлакова технологія наплавлення в СПК може розглядатися як ефективний спосіб зміцнення деталей обладнання, що експлуатується в умовах абразивного зношування та ударних навантажень.

2. До найбільш перспективних наплавних матеріалів для ЕШП в СПК деталей обладнання гірської техніки можна віднести високохромисті чавуни, що мають добре поєднання підвищених механічних властивостей та показників зносостійкості.

3. При ЕШН в СПК можна використовувати й інші високовуглецеві леговані матеріали, зокрема сталі 110Г13Л та швидкорізальні, але при цьому слід вибирати оптимальні області їх застосування і враховувати економічну доцільність їх наплавлення.

Список літератури

1. Вороненко Б.И. (1992) Современные износостойкие сплавы для рабочих органов измельчителей ударного действия (Обзор). *МиТОМ*, **11**, 13–19.

2. Липницкий А.М. (1973) *Плавка чугуна и сплавов цветных металлов*. Москва, Машиностроение.

3. Попов В.С., Гордиенко В.Н., Шумилов А.А., Гайдар О.Ф. (1986) Износостойкая наплавка бронифутеровочных плит шаровых барабанных мельниц. *Сварочное производство*, **6**, 10–11.

4. Никоненко А.С., Кривоспицкий В.М., Харитонов В.Ф. (1968) О кинетике упрочнения высокомарганцевых сталей. *Известия вузов. Черная металлургия*, **5**, 99–102.

5. Григоркин В.И. (1963) К вопросу о природе упрочнения аустенитных сталей. *Известия вузов. Черная металлургия*, **2**, 95–103.

6. Даляева Л.И. (1963) Теоретические основы упрочнения стали Г13 при наклепе. *Труды ЦНИИТМАШа*. Кн. 106. Москва, Машгиз, сс. 182–192.

7. Каракула М.В., Парфенов Л.И. (1968) Лабораторный контроль стали Г13 на износостойкость. *Литейное производство*, **7**, 37–38.

8. Блюхер В.В., Парфенов Л.И., Волчок И.П. (1970) Свойства пластически деформированной высокомарганцевистой стали. *МиТОМ*, **12**, 32–33.

9. Воронова Н.А., Теслюк А.К. (1965) Зубья ковшей экскаваторов ЭКГ-4 из хромомолибденовой стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **1-2**, 72–74.

10. Мадэй К. (1977) *Исследование и разработка технологии наплавки высокомарганцевой стали и упрочнения наплавленного слоя при восстановлении крестовин*. Дис. ... канд. техн. наук. Киев.

11. Шестаков А.М., Джур В.А., Зимокос Г.Н., Тимофеев В.М. (1979) Повышение износостойкости горнообогатительного оборудования. *Бюл. НТИ «Черная металлургия»*.

12. Медовар Б.И., Ксендзык Г.В. (1962) Электродуговой переплав аустенитной стали Г13. *Автоматическая сварка*, **9**, 18–21.

13. Кусков Ю.М., Богайчук И.Л., Шевченко Н.П., Фесенко М.А. (2021) Электродуговая наплавка стружкой стали 110Г13Л в токоподводящем кристаллизаторе. *Сварочное производство*, **1**, 3–9.

14. Астафьев А.А. (1997) Влияние размера зерна на свойства марганцевистой аустенитной стали 110Г13Л. *МиТОМ*, **5**, 18–20.

15. Кусков Ю.М., Сарычев И.С. (2004) Восстановительная электродуговая наплавка чугуновых валков стана 2000. *Сварочное производство*, **2**, 39–43.

16. Гарбер М.Е. (1972) *Отливки из белых износостойких чугунов*. Москва, Машиностроение.

17. Rohrig, K. (1971) Gefüge und Beständigkeit gegen Mineralverschleiss von carbidischen Gusseisen. *Giesserei*, **23**, 697–706.

18. Золочевский Г.Л. (1972) Анализ теоретических предположений и технологических методов улучшения свойств износостойких белых чугунов. *Новое в металловедении и металлургической технологии материалов для машиностроения*, 102, 13–28.
19. Бунин К.П., Лев И.Е., Снаговский В.М., Таран Ю.Н. (1965) О структуре хромистых белых чугунов. *Литейное производство*, 9, 23–24.
20. Таран Ю.Н., Снаговский В.М. (1966) Морфология эвтектики в Fe–C–Cr сплавах. *МіТОМ*, 4, 27–30.
21. Хорин Я.Д. (1963) *Термическая обработка стали*. Труды ЦНИИТМАШ. Кн. 106. Москва, Машгиз, сс. 148–160.
22. Гасик М.И. (2004) Сталь Гадфильда: Современное состояние технологии и материаловедения крестовин железнодорожных стрелочных переводов. *Современная электрометаллургия*, 1, 29–39.
23. Кусков Ю.М., Рябцев И.А., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. (2020) *Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлосодержащих отходов*. Киев, Интерсервис.
24. Дубоделов В.И., Погорский В.К., Шкурко В.К. и др. (2002) Применение магнитодинамической установки в технологии электрошлаковой наплавки жидким металлом стальных прокатных валков. *Проблемы спец. электрометаллургии*, 4, 9–10.
9. Voronova, N.A., Teslyuk, A.K. (1965) Bucket teeth of excavators EKG-4 from chromium-molybdenum steel. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, 1-2, 72–74 [in Russian].
10. Madej, K. (1977) *Study and development of technology for surfacing of high-manganese steel and strengthening of deposited layer in restoration of frogs*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kiev [in Russian].
11. Shestakov, A.M., Dzhur, V.A., Zimokos, G.N., Timofeev, V.M. (1979) *Increase of wear resistance of mining equipment*. Bul. NTI. Chyorn. Metallurgiya [in Russian].
12. Medovar, B.I., Kzyondzyk, G.V. (1962) Electroslag remelting of austenitic steel G13. *Avtomatich. Svarka*, 9, 18–21 [in Russian].
13. Kuskov, Yu.M., Bogaichuk, I.L., Shevchenko, N.P., Fesenko, M.A. (2021) Electroslag chip surfacing in current-conducting mold. *Svarochn. Proizvodstvo*, 1, 3–9 [in Russian].
14. Astafiev, A.A. (1997) Influence of grain size on properties of high-manganese austenitic steel 110G13L. *MіТОМ*, 5, 18–20 [in Russian].
15. Kuskov, Yu.M., Sarychev, I.S. (2004) Restoration electroslag surfacing of cast iron rolls of mill 2000. *Svarochn. Proizvodstvo*, 2, 39–43 [in Russian].
16. Garber, M.E. (1972) *Castings from white wear-resistant irons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
17. Rohrig, K. (1971) Gefuge und Bestandigkeit gegen Mineralverschleiss von carbidischen Gusseisen. *Giesserei*, 23, 697–706.
18. Zolochovsky, G.L. (1972) Analysis of theoretical backgrounds and technological methods for improvement of properties of white wear-resistant irons. In: *Novelty in physical metallurgy and metallurgical technology of materials for mechanical engineering*. 102, 13–28 [in Russian].
19. Bunin, K.P., Lev, I.E., Snagovsky, V.M., Taran, Yu.N. (1965) On structure of chromium white cast irons. *Litejnoe Proizvodstvo*, 9, 23–24 [in Russian].
20. Taran, Yu.N., Snagovsky, V.M. (1966) Morphology of eutectics in Fe–C–Cr alloys. *MіТОМ*, 4, 27–30 [in Russian].
21. Khorin, Ya.D. (1963) *Heat treatment of steel*. Trudy TsNIITMASH. Book 106. Moscow, Mashgiz, 148–160 [in Russian].
22. Gasik, M.I. (2004) Hadfield steel: State-of-the-art of technology and materials science of railway switch frogs. *Advances in Electrometallurgy*, 1, 27–36.
23. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentyugov, I.P. (2020) *Electroslag technologies of surfacing and recycling of metal and metal-containing wastes*. Kiev, Interservice [in Russian].
24. Dubodelov, V.I., Pogorsky, V.K., Shkurko, V.K. et al. (2002) Application of magnetodynamic unit in the technology of electroslag cladding of steel mill rolls using a liquid metal. *Advances in Electrometallurgy*, 4, 7–8.

References

1. Voronenko, B.I. (1992) Modern heat-resistant alloys for working elements of impact grinders (Review). *MіТОМ*, 11, 13–19 [in Russian].
2. Lipnitsky, A.M. (1973) Melting of cast iron and alloys of nonferrous metals. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Popov, V.S., Gordienko, V.N., Shumilov, A.A., Gajdar, O.F. (1986) Hardfacing of armor lining plates of ball-tube mills. *Svarochn. Proizvodstvo*, 6, 10–11 [in Russian].
4. Nikonenko, A.S., Krivospitsky, V.M., Kharitonova, V.F. (1968) On kinetics of strengthening of high-manganese steels. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, 5, 99–102 [in Russian].
5. Grigorkin, V.I. (1963) To problem of nature of strengthening of austenitic steels. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, 2, 95–103 [in Russian].
6. Dalyaeva, L.I. (1963) Theoretical principles of strengthening of G13 steel in cold working. Trudy TsNIITMASH. Book 106. Moscow, Mashgiz, 182–192 [in Russian].
7. Karakula, M.V., Parfenov, L.I. (1968) Laboratory control of G13 steel on wear resistance. *Litejnoe Proizvodstvo*, 7, 37–38 [in Russian].
8. Blyukher, V.V., Parfenov, L.I., Volchok, I.P. (1970) Properties of plastically deformed high-manganese steel. *MіТОМ*, 12, 32–33 [in Russian].

SELECTION OF WEAR-RESISTANT MATERIALS FOR ELECTROSLAG SURFACING OF MINING EQUIPMENT PARTS IN A CURRENT-CONDUCTING MOULD

A.V. Netyaga, Yu.M. Kuskov, V.M. Proskudin, V.O. Zhdanov

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The conditions of operation of the parts and components of mining equipment, which are made mostly from 110G13L steel, are considered. Limited possibilities for application of this steel to improve the equipment service life are noted. The possibility of application of electroslag surfacing in a current-conducting mould by different high-carbon materials is shown as an alternative. High-chromium cast irons should be considered the most promising surfacing material. They have a good combination of higher mechanical properties and resistance to abrasive and shock-abrasive wear. 24 Ref., 2 Tabl., 1 Fig.

Keywords: parts of mining equipment, wear, electroslag surfacing, current-conducting mould, 110G13L steel, high-chromium cast iron, high-speed steel

Надійшла до редакції 29.12.2021

МІКРОКОНТРОЛЕРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

Ю.М. Ланкін, В.Ф. Семікін, І.Ю. Романова, Є.М. Байштрук, П.П. Осечков, І.В. Крикуненко

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

Описано мікроконтролерний регулятор контактного зварювання з компенсацією збурень напругою мережі живлення на зварювальний струм. В алгоритмі роботи регулятора нелінійні регулюючі характеристики представлено в табличній формі. Описано алгоритм визначення необхідного кута відкриття тиристорів при коливаннях напруги мережі живлення. Обґрунтовано вибір параметрів, які впливають на створення регулятора з використанням мікроконтролерів широкого застосування. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: контактне зварювання, напруга мережі, зварювальний струм, регулятор струму, алгоритм роботи, мікроконтролер

Вступ. Регулятори контактного зварювання, які побудовані на сучасній елементній базі з використанням мікроконтролерів, мають в своєму складі функцію стабілізації зварювального струму шляхом компенсації збурень при коливаннях напруги мережі живлення. Регулятори струму компенсаційного типу простіші та надійніші за замкнені системи регулювання та отримали широке розповсюдження в зварювальному виробництві. Вони мають малу інерційність, що є важливим для зварювання на жорстких режимах. Як показали перші дослідження [1] та аналізи, проведені за допомогою комп'ютерних систем управління та контролю [2, 3], компенсація впливу коливань напруги мережі живлення на зварювальний струм збільшує стабільність міцності зварюваних точок.

Робота регуляторів струму контактного зварювання ґрунтується на використанні регулюючих характеристик зварювального струму в залежності від кута відкриття тиристорів для різних $\cos \varphi$ зварювальної машини [4, 5]. При розробці регуляторів струму контактного зварювання частіше за все регулюючі характеристики апроксимуються залежностями, зручними для реалізації управління [6]. Разом з тим в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова спільно з ІЕЗ ім. Є.О. Патона було запропоновано концепцію побудови цифрових регуляторів контактного зварювання [7], яка ґрунтується на представленні регулюючих характеристик у вигляді таблиць з певною дискретизацією. Перші цифрові регулятори були створені з кроком дискретизації $\pi/32$ рад (близько 6 ел. град.) та показали свою працездатність і принципову можливість покращення з розвитком засобів обчислювальної техніки. Останнім часом розроблено та випробувано регулятор контактного зварювання з кроком дискретизації по куту відкриття тиристо-

рів $\pi/200$ рад (менше за 1 ел. град.), в якому використовується простий мікроконтролер [8].

Мета роботи – створення регулятора струму контактного зварювання компенсаційного типу шляхом компенсації збуджень при коливаннях напруги мережі живлення та зміні коефіцієнта потужності зварювальної машини з використанням мікроконтролерів широкого застосування. Для цього здійснити раціональне перетворення регулювальних характеристик у табличну форму для ефективного використання ресурсів мікроконтролерів та вибору їх параметрів.

Розрахункові дослідження. Залежності зварювального струму від кута відкриття тиристорів α для різних $\cos \varphi$ зварювальної машини можуть бути описані матрицею $I[\alpha, \varphi]$, елементами якої є діючий струм в % від повнофазного для кутів α і φ , наведених у цілочисельному вигляді в межах $1 \dots N$ з кроком дискретизації π/N рад. Зворотна задача визначення кута відкриття α для заданого зварювального струму [9], в даному випадку для цифрового регулятора, полягає в пошуку матриці $\alpha[I_z, \varphi]$. Задача вирішується шляхом підстановки в якості елементів матриці $\alpha[I_z, \varphi]$ кутів відкриття α для заданого струму I_z з матриці $I[\alpha, \varphi]$. Процедура отримання матриці $\alpha[I_z, \varphi]$ виконується на персональному комп'ютері при підготовці до програмування мікроконтролера. При цьому характеристики в табличному вигляді можуть бути представлені без спотворень, що характерні для лінеаризації або іншої апроксимації нелінійних характеристик. Об'єм пам'яті для табличного подання залежить від кроку дискретизації та обмежується ресурсами мікроконтролера та необхідною точністю. З метою раціонального використання програмної пам'яті мікроконтролера розглянемо особливості залежності кута відкриття $\alpha = n \cdot \pi/200$ від заданого струму

Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>, Семікін В.Ф. – <https://orcid.org/0000-0002-7407-5887>, Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© Ю.М. Ланкін, В.Ф. Семікін, І.Ю. Романова, Є.М. Байштрук, П.П. Осечков, І.В. Крикуненко, 2022

(рис. 1). Робоча частина струмів обмежується зни-
зу значенням 15 %. Реальні значення $\cos \varphi$ знахо-
дяться в інтервалі 0,2...0,8 ($\varphi = 0,21\pi \dots 0,44\pi$). Від-
мінності струмів в інтервалі значень 15...25 % для
характеристик з різними φ знаходяться в межах
1,5 % і можуть бути представлені однією залежні-
стю для всіх реальних значень φ . В інтервалі стру-
мів 26...90 % дискретизація по φ близько $\pi/100$ рад
призводить до відмінності характеристик, що зна-
ходяться поряд, не більше ніж 1,0 %. Для струмів
більше 90 % відмінність сусідніх характеристик
в 1,0 % досягається при кроці дискретизації по φ
менше $\pi/100$. Таким чином, з метою зменшення за-
ймаемого об'єму програмної пам'яті мікроконтро-
лера первинна матриця $\alpha[I_3, \varphi]$ може бути замінена
декількома матрицями з різною дискретизацією по
 φ на різних інтервалах значень I_3 . Для ілюстрації
такого подання нижче наведено фрагменти табли-
ці залежності кута відкриття тиристорів α від зада-
ного струму I_3 для різних значень φ (табл. 1, 2), де
 $\alpha = n \cdot \pi/200$, $\varphi = i \cdot \pi/100$, в клітинках таблиці наве-
дено значення n .

У більшості мікроконтролерних регуляторів
відбувається автоматичне налаштування на $\cos \varphi$
зварювальної машини. Для цього проводять ви-
мірювання кута відкриття α і тривалості λ ввімк-
неного стану тиристорів, на підставі яких роз-
раховують коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ (або φ).
 φ визначається чисельним рішенням рівняння,

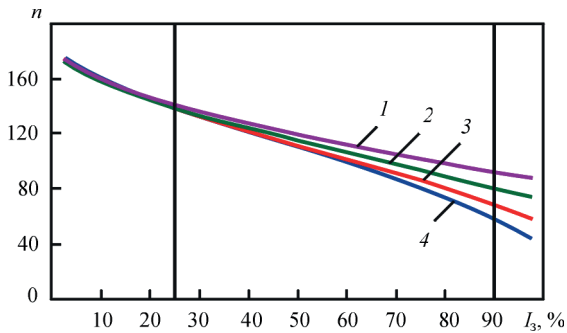


Рис. 1. Залежність кута відкриття тиристорів $\alpha = n \cdot \pi/200$
від заданого струму I_3 для різних значень φ : 1 – $\varphi = 0,44\pi$;
2 – $0,37\pi$; 3 – $0,29\pi$; 4 – $0,21\pi$

Таблиця 1. Фрагмент таблиці залежності кута відкриття тиристорів $\alpha = n \cdot \pi/200$ від заданого струму I_3 (15...25 %) для
різних $\varphi = i \cdot \pi/100$

$I_3, \%$	i														Середнє по $\varphi = 0,21\pi \dots 0,44\pi$
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	...	44	
15	156	155	155	155	155	155	154	154	154	154	154	154		155	154
16	154	154	154	154	153	153	153	153	153	153	153	153		154	153
17	153	153	152	152	152	152	152	152	151	151	151	151		153	152
18	151	151	151	150	150	150	150	150	150	150	150	150		151	150
19	150	150	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149		150	149
20	148	148	148	148	148	148	147	147	147	147	147	147		149	148
21	147	147	147	146	146	146	146	146	146	146	146	146		148	147
22	146	146	146	145	145	145	145	145	145	145	145	145		147	145
23	145	144	144	144	144	144	144	144	144	144	143	143		146	144
24	143	143	143	143	143	142	143	142	142	142	142	142		145	143
25	142	142	142	141	141	141	141	141	141	141	141	141		144	142

що описує перехід струму через нульове значен-
ня: $\sin(\lambda + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot \exp(-\lambda \cdot \operatorname{ctg} \varphi) = 0$.
Для розрахунку φ в контролерах використовують-
ся апроксимуючі залежності результатів рішення
цього рівняння. Аналогічно роботі [7], викори-
стаємо альтернативний підхід – подання залежно-
сті $\varphi(\alpha, \lambda)$ таблицею відповідності. Нижче наведе-
но таблицю відповідності (табл. 3) для визначення
 φ в межах $0,21\pi \dots 0,44\pi$ з кроком дискретизації по
 α і $\lambda - \pi/50$ і по $\varphi - \pi/100$ ($\varphi = i \cdot \pi/100$, $\lambda = j \cdot \pi/50$,
 $\alpha = n \cdot \pi/50$). Як ми бачимо, таблиця має багато по-
рожніх клітинок (порожні клітинки відповідають
 φ за межами $0,21\pi \dots 0,44\pi$). Для раціонального ви-
користання пам'яті мікроконтролера в алгоритмі
роботи регулятора реалізується процедура визна-
чення кута φ по α і λ з ряду одномірних таблиць,
які отримано з повної таблиці відповідності та не
містять порожніх клітинок.

Усі дані елементів матриць $\alpha[I_3, \varphi]$ і $\varphi[\alpha, \lambda]$
представлені цілими однобайтними числами, на-
приклад, 1...200 (максимально 1...255). Крок дис-
кретизації контролюємих часових даних (кут від-
криття тиристорів і тривалість ввімкненого стану
тиристорів) при цьому буде складати $\pi/200$ рад, а
період часу відліку при оцифруванні в контролері
– 50 мкс. Такий період відліку часових даних і об-
числень можуть реалізувати мікроконтролери ши-
рокого застосування лінії PIC16, PIC18 (Microchip)
з прийнятною точністю навіть при використанні
внутрішнього генератора (без зовнішніх кварцо-
вих резонаторів). У згаданому регуляторі контак-
тного зварювання [8] застосовано мікроконтролер
PIC16F886 (частота внутрішнього генератора –
8 МГц, внутрішня Flash пам'ять – 16 кбайт). При
використанні описаних вище методів перетворення
первинних матриць об'єм програмної Flash пам'я-
ті мікроконтролера дозволяє зберігати всі необхід-
ні дані. Поряд з керуючими функціями контролер
також повинен виконувати функції людино-ма-
шинного інтерфейсу. Контролери лінії PIC16 (на-
приклад, PIC16F886) дозволяють виконувати ви-
дображення параметрів за допомогою алфавіт-
но-цифрових дисплеїв (LCD). Враховуючи тенден-

Таблиця 2. Фрагменти таблиці залежності кута відкриття тиристорів $\alpha = n \cdot \pi / 200$ від заданого струму I_3 (26...90 %) для різних $\varphi = i \cdot \pi / 100$

$I_3, \%$	i															
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	...	43	44
26	141	141	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140		142	143
27	140	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139		141	142
28	138	138	138	138	138	137	137	137	137	137	138	138	138		140	141
...																
60	102	102	102	102	102	103	103	103	104	104	105	105	106		114	115
61	101	101	101	101	101	102	102	102	103	103	104	104	105		113	114
62	100	100	100	100	100	101	101	102	102	103	104	104	105		112	113
...																
88	65	66	67	68	69	70	72	73	74	75	77	78	79		95	96
89	64	65	66	67	68	69	70	71	73	74	76	77	78		94	95
90	63	64	65	66	67	68	69	70	71	73	74	76	77		93	94

ції розвитку вбудованих систем управління, можна реалізувати пульт оператора, використовуючи кольорові рідинно-кристалічні TFT-дисплеї з сенсорними екранами (Touch Screen) та недорогі восьмибітові мікроконтролери лінії PIC18 (PIC18F87J50, PIC18F67K40, PIC18F97J94).

Алгоритм коригування кута відкриття α тиристорів при зміні напруги в мережі. При відхиленні напруги в мережі від номінального значення $U_m \neq U_{ном}$ змінюється діюче значення струму. Запропоновано два варіанти визначення відкоригованого кута відкриття α тиристорів. Перший полягає в реалізації метода регулювання за моделлю. Діюче значення струму за моделлю визначається за виразом $I_{д\,мод} = I_{ном}(\alpha, \varphi) \cdot U_m / U_{ном}$, де в якості $I_{ном}(\alpha, \varphi)$ береться відповідний елемент матриці $I[\alpha, \varphi]$ для даних значень α і φ . Алгоритм регулятора реалізує ітераційну процедуру вибору необхідного кута відкриття α , що задовольняє вимозі $I_{д\,мод} = I_3$. Другий варіант ґрунтується на визначенні кута відкриття тиристорів з матриці $\alpha[I_3, \varphi]$, в якій в якості I_3 використовується відкориговане значення заданого струму, розраховане за виразом $I_{з\,кор}(\alpha) = I_3(\alpha) \cdot U_{ном} / U_c$. В обох варіантах потрібні операції цілочисельного множення та ділення. Особливість алгоритму полягає в тому, що сигнал напруги мережі на вході аналого-цифрового пере-

творювача контролера масштабується таким чином, щоб при $U_m = U_{ном}$ цифровий код відповідав цифрі 2^n , наприклад 512. В цьому випадку операції множення та ділення на $U_{ном}$ можуть бути замінені операціями побітового зсуву, що дозволяє прискорити обчислення та скоротити витрати ресурсів мікроконтролера.

Експериментальні результати. На рис. 2 наведено експериментальні статичні характеристики відпрацювання регулятором завдання струму для різних значень φ . З рисунку видно, що при I_3 більше за 80 % при деяких значеннях φ зростає похибка регулювання. Збільшення похибки регулювання обумовлене необхідністю зменшення кроку дискретизації по φ в матриці $\alpha[I_3, \varphi]$ на максимальних струмах (як було показано вище) і реальними можливостями зменшення кроку дискретизації з урахуванням точності непрямого способу вимірювання φ . Разом з тим необхідне виконання умови $\alpha_{min} \geq \varphi$.

Експериментальні статичні характеристики регулятора при зміні напруги в мережі від 320 до 420 В для різних значень заданого струму та коефіцієнтів потужності навантаження показали, що діюче значення струму змінюється не більше, ніж на $\pm 2 \%$ від I_3 в межах 40...80 % [8].

Таблиця 3. Приклад таблиці відповідності для визначення $\varphi = i \cdot \pi / 100$ за кутом відкриття тиристорів $\alpha = n \cdot \pi / 50$ та тривалості увімкненого стану тиристорів $\lambda = j \cdot \pi / 50$

j	n																
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
24																	25
25																24	29
26															23	28	34
27														22	26	32	39
28													21	25	30	36	43
29													25	29	34	40	
30												24	28	32	38	44	
31													23	27	31	36	41
32										23	26	30	34	39			
33									22	25	29	33	38	42			
34								22	25	28	32	36	41				
35							22	25	28	31	35	39	43				
36						21	24	27	30	34	38	42					
37					21	24	27	30	33	36	40						
38					23	26	29	32	35	39	42						
39				23	26	29	32	35	38	41							
40			23	26	28	31	34	37	40	43							
41		23	25	28	30	33	36	39	42								
42	23	25	27	30	33	35	38	41	44								

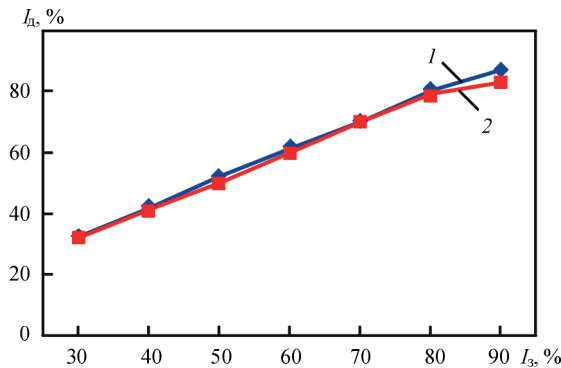


Рис. 2. Експериментальні дані відпрацювання завдань струму регулятором для різних значень ϕ : 1 – $\phi = 0,25\pi$; 2 – $\phi = 0,35\pi$

Висновки

Представлено мікроконтролерну реалізацію побудови цифрових регуляторів контактної зварювання, яка ґрунтується на табличному описі регулюючих характеристик. В даному регуляторі здійснюється задання струму (y % від повнофазного), відпрацювання регулятором необхідного зварювального струму, стабілізація струму при зміні напруги мережі, що дозволяє зварювальнику відтворювати напрацьовані режими зварювання і тим самим покращити якість зварних з'єднань.

Запропоновано методи перетворення та зменшення розмірів матриць регулюючих характеристик, які дозволяють створити регулятори контактної зварювання з застосуванням мікроконтролерів масового використання.

Обґрунтовано перетворення даних процесу зварювання в цілочисельний вид з прийнятним кроком для раціонального використання в програмі мікроконтролера.

Запропоновано алгоритми коригування кута відкриття тиристорів при зміні напруги в мережі з використанням регулюючих матриць, які дозволяють стабілізувати зварювальний струм. Алгоритми також скорочують витрати ресурсів мікроконтролера.

Список літератури

1. Ланкин Ю.Н. (1963) Автоматическое регулирование режима точечной сварки по электрическим параметрам. *Автоматическая сварка*, **5**, 16–19.

MICROCONTROLLER REGULATOR OF FLASH BUTT WELDING CURRENT

Yu.M. Lankin, W.F. Semikin, I.Yu. Romanova, E.M. Bayshtрук, P.P. Osechkov, I.V. Krykunenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Microcontroller regulator of flash butt welding with compensation of disturbances by the mains voltage on welding current is described. In the algorithm of the regulator operation, nonlinear control characteristics are presented in a tabular form. The algorithm for determining the required angle of thyristor opening during oscillations of mains voltage is described. The choice of parameters was substantiated, influencing the creation of the controller using widely used microcontrollers. 9 Ref., 3 Tabl., 2 Fig.

Keywords: flash butt welding, mains voltage, welding current, current regulator, algorithm, microcontroller

Надійшла до редакції 29.10.2021

2. Gavrish, V.S., Rudenko, P.M., Podola, N.V. (2007) System of automatic control and monitoring of resistance spot welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 45–48.

3. Анциборов А. Н. (2019) Обеспечение качества контактной сварки при действии возмущений в условиях массового производства: Дис. ... канд. техн. наук. Московский гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, Тольяттинский гос. ун-т.

4. Патон Б.Е., Лебедев В.К. (1969) *Электрооборудование для контактной сварки*. Москва, Машиностроение.

5. Рыськова З.А., Федоров П.Д., Жимерова В.И. (1990) *Трансформаторы для электрической контактной сварки*. Ленинград, Энергоатомиздат.

6. Klimov, A.S., Antsiborov, A.N., Klimov, V.S., Kudinov, A.K. (2019) Current Regulation in Contact Welding. *Russian Engineering Research*, **39**(9), 766–771. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19090119>

7. Никулин В.Н. (1967) *Разработка и исследование системы программного управления с автокоррекцией для автоматизации процесса точечной контактной электросварки*: Дис. канд. техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.

8. Lankin, Yu.N., Semikin, V.F., Bajshtruk, E.N. (2017) Stabilization of welding current of resistance spot welding machines at mains voltage fluctuations. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 31–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.06>

9. Аксельрод Ф.А., Донской А.В. (1967) Определение угла зажигания вентилей при заданной программе изменения сварочного тока. *Автоматическая сварка*, **1**, 9–10.

References

1. Lankin, Yu.N. (1963) Automatic control of spot welding mode by electric parameters. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 16–19 [in Russian].

2. Gavrish, V.S., Rudenko, P.M., Podola, N.V. (2007) System of automatic control and monitoring of resistance spot welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 45–48.

3. Antsiborov, A.N. (2019) *Quality assurance of resistance welding under action of mass production disturbances*. In: Syn. of Thesis for Cand. Tech. Sci. Degree. Moscow GTU, Toliyatti GU [in Russian].

4. Paton, B.E., Lebedev, V.K. (1969) *Electric equipment for resistance welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

5. Ryskova, Z.A., Fedorov, P.D., Zhimerova, V.I. (1990) *Transformers for electric resistance welding*. Leningrad, Energoatomizdat [in Russian].

6. Klimov, A.S., Antsiborov, A.N., Klimov, V.S., Kudinov, A.K. (2019) Current regulation in contact welding. *Russian Engineering Research*, **39**(9), 766–771. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19090119>

7. Nikulin, V.N. (1967) *Development and research of program control system for automation of process of electric resistance spot welding*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kiev, PWI [in Russian].

8. Lankin, Yu.N., Semikin, V.F., Bajshtruk, E.N. (2017) Stabilization of welding current of resistance spot welding machines at mains voltage fluctuations. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 31–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.06>

9. Akselrod, F.A., Donskoj, A.V. (1967) Determination of firing angle of valves by preset program of change of welding current. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 9–10 [in Russian].

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ МОБІЛЬНИХ РЕЙКОЗВАРЮВАЛЬНИХ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Д.І. Малишева, Н.А. Виноградов, В.Ю. Сисоєв

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: dep26kb@paton.kiev.ua

Досліджено конструктивні особливості мобільних рейкозварювальних машин для контактного стикового зварювання виробництва компаній, які працюють на сучасному мировому ринку. Дослідження дають можливість висвітлити тенденції подальшого удосконалення устаткування зі зростанням технологічних інновацій. Бібліогр. 18, рис 13.

Ключові слова: безстикова колія, контактне стикове зварювання рейок, рейкозварювальна машина, осадка, зусилля осадки, затискання, зусилля затискання, безперервне оплавлення, пульсуюче оплавлення, гратознімач, струмопідведення

Безстикова колія є найбільш прогресивною і надійною конструкцією колії для сучасних умов експлуатації. Рейки, з яких складається така колія, не мають стиків і це дозволяє підвищити допустимі швидкості руху поїздів до 160...200 км/год і більше. При укладанні безстикових шляхів, а також при їх ремонті, рейки зварюють в довгомірні пліті. Нормативні документи дозволяють застосовувати для з'єднання рейок в головну лінію тільки контактне стикове зварювання, яке забезпечує рівномірність зварних з'єднань з основним металом, в тому числі і за показниками втомної міцності [1]. Пліті зварюються або стаціонарними машинами на рейкозварювальних заводах, а потім доставляються до місця монтажу, або в шляху – мобільними пересувними рейкозварювальними комплексами.

Глобальний ринок машин для контактного стикового зварювання становить тисячі одиниць обладнання, а ринок прибутку – мільйони доларів США.

Консалтингова компанія QY Research у 2020 р. оприлюднила звіт «Global rail welding machines market insights and forecast to 2027» [2]. Згідно зі звітом протягом прогнозованого періоду виручка мобільного сектора рейкозварювальних машин складе близько 70 % частки ринку, а стаціонарного – тільки 30 %. Застосування стаціонарних рейкозварювальних машин постійно зменшується. Тобто до 2027 р. обсяг світового ринку мобільних рейкозварювальних машин досягне 82 млн дол. США в порівнянні з 54 млн дол. США у 2020 р. при середньорічному темпі зростання 2,9 % протягом 2021–2027 рр.

З точки зору ринку безстикові залізничні колії повинні бути безпечними, а витрати на їх укладання і утримання мінімізовані. Це ставить підвищені вимоги до надійності конструкції устаткування, тому актуальним є аналіз технічних

можливостей мобільних рейкозварювальних машин. Автори пропонують проаналізувати конструктивні відмінності мобільних рейкозварювальних машин різних виробників.

QY Research акцентує увагу на діяльність наступних компаній, які представлені на ринку мобільного рейкозварювального обладнання: Chengdu Aigre Technology (Китай), Holland LP, Schlatter Group (Швейцарія), Goldschmidt (Німеччина), Mirage Ltd (Англія), ПрАТ КЗЕЗУ (Каховський завод електрозварювального устаткування) (Україна), Progress Rail (Caterpillar) (США), Geismar (Франція), Gantrex (Бельгія), BAIDIN GmbH (Німеччина), Vossloh (Німеччина), Plasser & Theurer (Австрія), фірма «Псковелектросвар» (Росія), Contrail Machinery (Румунія), VAIA CAR SPA (Італія).

Відповідно до конструкції мобільні рейкозварювальні машини складаються з нерухомих і рухомого затискачів, які здійснюють фіксацію рейок за допомогою циліндрів затиску. Рухомий затискач має змогу пересуватись відносно нерухомого затискача за допомогою циліндрів осадки. Зварювальний струм від джерел живлення, які встановлені на машині, нагріває рейки до пластичного стану. Внаслідок швидкого пересування затиснутих та нагрітих рейок відбувається їх з'єднання – зварювання. При цьому частина розплавленого металу (грат) залишається по контуру зварених рейок. Нормативні документи [3], що визначають вимоги до методу стикового зварювання оплавленням на мобільних рейкозварювальних машинах не допускають наявності грату після зварювання, тому в кожній машині передбачено пристрій для його зняття – гратознімач.

Не будемо розглядати продукцію компанії Goldschmidt, оскільки вона спеціалізується на термітному і дуговому зварюванні, а також компанію

Малишева Д.І. – <https://orcid.org/0000-0001-9058-1053>

© Д.І. Малишева, Н.А. Виноградов, В.Ю. Сисоєв, 2022

Vossloh, тому що зварювальна головка дуже нагадує машину виробництва Schlatter Group.

ПрАТ КЗЕЗУ (Каховський завод електро-зварювального устаткування) виробляє широкий асортимент мобільних рейкозварювальних машин конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона [1], призначених для будівництва і ремонту безстикових швидкісних залізничних магістралей, трамвайних ліній і ліній метрополітену в польових умовах [4]. Підприємство поставляє на ринок як зварювальні машини K900 з важільною схемою затиснення (рис. 1), так і машини K920 (рис. 2), K922-1, K945, K950 з горизонтальним розташуванням циліндрів затискання для створення постійного, що не залежить від зношення губок, зусилля. Згідно нормативних документів [5], зварювання рейок може проводитися двома способами: з підтяжкою рейкової пліті та з попереднім вигином. При зварюванні рейок з попереднім вигином розкріплюють частину пліті, піднімають її і вигинають у горизонтальній площині до збігу торців. В процесі зварювання вигін пліті випрямляється під дією поздовжнього зусилля, яке створює зварювальна машина. Машини K922 (рис. 3), K945, K950 розвивають зусилля осадки 1200 кН. Це дає можливість виключити вигин, виконуючи зварювання рейок в колію з підтяжкою пліті і мінімізувати довжину рейки, яка звільнюється від шпал. Це спрощує процес зварювання, а також дає змогу виконувати операцію «останнього зварювання», тобто зварювання і вирівнювання напружень в рейках за одну операцію. Машини [6] складаються з двох кліщових затискних пристроїв, виконаних у вигляді двох двоплечих важелів, які насаджені на спільну центральну вісь та ізольовані один від одного. Два кліщові затискні пристрої виконані з можливістю переміщення по осі відносно один одного за допомогою двох гідроциліндрів осадки, штоки яких зв'язують їх. Як джерело нагрівання рейок використовуються два вбудовані в машину трансформатори змінного струму. Оригінальна конструкція зварювального контуру, де в якості струмопровідних елементів використовуються силові вузли машини, дозволяє знизити потужність, що споживається при зварюванні. Затиск здійснюється за шийку рейок. Якщо в машині K900 грат знімається ходом рухомої колони (використовується накидний гратознімач), то на машинах K922, K945 (рис. 4), K950, крім накидного, передбачений гратознімач з приводом від вбудованих автономних гідроциліндрів. Це дозволяє знімати грат в затиснутому стані і утримувати стик необхідний для охолодження час. Конструктивною особливістю цих машин є наявність вбудованих в циліндри затискання мультиплікаторів, які підвищують тиск, а відповідно і зусилля затискання в 2 і більше рази (максимальне зусилля затискання при найбільшо-

му робочому тиску складає 2900 кН) для уникнення проковзування колон при осадці. Машини K945, K950 мають збільшений хід циліндрів осадки 400 і 250 мм відповідно, що унеможливило розрив нагрітого стику при розтисканні [7]. Всі машини спроектовані і виготовлені з урахуванням особливостей розробленої в ІЕЗ ім. Є.О. Патона технології пульсуючого оплавлення. Маса зварювальної головки не перевищує 3500 кг.

Машини входять до складу пересувного рейкозварювального комплексу у вигляді 20-футового контейнера, призначеного для установки на базу вантажного автомобіля і на залізничну платформу.

Слід зазначити, що ключові гравці на ринку мобільних рейкозварювальних машин, як то Chengdu Aigre Technology, Holland LP, Progress Rail (Caterpillar), Geismar, Gantrex, Contrail Machinery, VAIA CAR SPA в якості зварювальної головки в своїх установках використовують устаткування, яке було в різні роки спроектовано в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і виготовлене на ПрАТ КЗЕЗУ.

Компанія **Shlatter** пропонує мобільні рейкозварювальні машини AMS60, AMS100 і AMS200 в різних конфігураціях, які відрізняються між собою системою вирівнювання рейок (центруванням) і робочим діапазоном [8].

Машини AMS60 і AMS200 містять корпус і повзун, які мають можливість лінійно переміщатися. Затискні системи встановлюються в корпусі та повзуні. Ексцентрикова система затиснення, що приводиться в дію циліндрами затиску, має змогу самозаклинюватися, що дозволяє збільшити зусилля затискання при додаванні зусилля осадки. Затиск здійснюється за шийку рейок. Циліндр осадки, розташований над віссю затискання рейки, може через двоплечий важіль переміщати повзун. Перед затисканням інтегрований підйомний гідравлічний пристрій притискає обидва кінці рейок до упорів для здійснення вертикального вирівнювання (центрування) рейок по поверхні кочення.

При розробці машини AMS60 (рис. 5) основна увага приділялася центруванню – точному поєднанню кінців рейок по бічній грані (можна вибирати зліва чи справа) і поверхні кочення. Тому цю машину найкраще використовувати там, де потрібно точне вирівнювання, наприклад, для високошвидкісних залізничних магістралей (для рейок до 68 кг/м). AMS60 має зусилля осадки 6000 кН. Маса AMS60 близько 6200 кг.

Машина AMS100 (рис. 6) призначена для зварювання рейок великого перерізу. AMS100 має зусилля осадки 1000 кН і може зварювати важкі і навіть трамвайні жолобчасті рейки. Вона часто використовується для зварювання колії вантажних перевезень навантаженням на вісь до 75 кг/м. Проте AMS100 також застосовувалася для зварю-



Рис. 1. Мобільна рейкозварювальна головка K900



Рис. 2. Рейкозварювальна головка K920-1



Рис. 3. Зварювальна машина K922-1



Рис. 4. Зварювальна машина K945

вання високошвидкісних залізничних магістралей. Зварювальна головка AMS100 за кінематичною



Рис. 5. Контейнерна система зварювання рейок Multiflex зі зварювальною головкою AMS60



Рис. 6. Зварювальна головка AMS100



Рис. 7. Мобільна машина AMS200

схемою ідентична машині K920 (проекування ІЕЗ ім. Є.О. Патона).

AMS200 (рис. 7) [9] – це мобільна рейкозварювальна машина нового покоління, що дозволяє виконувати зварювання і натяг без додаткового тягнучого пристрою, а також операцію «останнього зварювання». Зусилля натягу і осадки – 1400 кН. Машина має необхідне зусилля, щоб підтягувати рейки на необхідну розрахункову довжину. Повний хід циліндрів затискання – 300 мм. Перевірка і настройка при необхідності точного бокового вирівнювання рейок здійснюється за допомогою



Рис. 8. Зварювальний апарат контейнерного типу ART1500RC



Рис. 9. Машина B120AC



Рис. 10. Індукційний зварювальний робот фірми Mirage Rail електронної вимірювальної системи. Струмопідведення повністю незалежно від затискання і здійснюється по зовнішній стороні головки рейок і їх ніжки. Маса та габарити машини AMS200 не перевищує масу машини AMS60.

Представлені машини доступні в двох варіантах:

- Supra Road flex – самохідна система на базі вантажного автомобіля, яка розрахована на повні-



Рис. 11. Мобільна машина MCP-80.01



Рис. 12. Мобільна машина MCP-12001.01

стю автономну роботу з можливістю переміщення від однієї ділянки до іншої по колії або поза неї;

- Supra Multiflex дозволяє все обладнання помістити в контейнер і встановити на залізничну платформу. Для стандартної комплектації використовують компактний 30-футовий контейнер.

В якості альтернативи є також доступна система, що складається з двох 20-футових контейнерів.

Мобільні рейкозварювальні машини австрійської фірми Plasser & Theurer серії APT500 базуються на зварювальній головці конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Нова розробка фірми – повністю автоматизований робот APT 1500R [10]. Це означає, що зварювальний робот потрібно лише опустити на зону зварювання, а далі процес проходить автоматично. Конструкція APT 1500R забезпечує роздільне докладання зварювального струму і затискання рейок. Рейки піднімаються зі шпал за допомогою підйомних пристроїв, центруються по висоті і вирівнюються по робочій кромці, а спеціальна вимірювальна система постійно контролює цей процес. Циліндри осадки притискають шийку рейки до упорів із зусиллям 3500 кН. Циліндри затискання, циліндри осадки розташовані в одній площині, яка проходить через нейтральну вісь рейки [11]. Таке конструктивне рішення захищає машину від небажаних навантажень. Конструкція машини дозволяє виконувати підтяжку рейок і осадку – тягове зусилля складає 1500 кН. Хід циліндрів осадки становить 200 мм.

Особливістю зварювального робота є те, що він використовує джерело змінного струму з частотою 1000 Гц. Джерело живлення складається з трансформаторів змінного струму, напруга яких випрямляється за допомогою діодів, а інвертори потім перетворюють постійну напругу назад в змінну, але з частотою 1000 Гц. Це дозволяє використовувати компактні трансформатори, а з іншого боку така зварювальна напруга має низьку залишкову пульсацію, що позитивно впливає на якість зварювання [10]. Струмopідводи притискаються до рейок за допомогою окремих гідроциліндрів. Струмopідведення здійснюється на нижню частину головки і верхню сторону підшви рейки. У конструкцію робота вбудований гратознімач з гідроциліндрами, які навантажують зварне з'єднання в напрямку стиснення стику (відповідно до вимог стандарту EN14587-2 [3]) і не потребують розтискання. Постійне безконтактне вимірювання температури рейок дозволяє точно охолоджувати рейки відповідно до заданої температурної характеристики за допомогою імпульсів повторного нагріву. Маса зварювальної головки складає 5500 кг.

Зварювальний робот зварює рейки, укладені в пліть, і може виконувати закриваючі і остаточні зварні стики.

Є три модифікації зварювального робота:

- апарат для стикового зварювання оплавленням ART 1500 RA. Ця чотиривісна машина вбудована в залізничний рухомий склад стандартної конструкції;

- ART1500RC – зварювальний апарат контейнерного типу (рис. 8);

- ART1500RL – зварювальний робот на автомобільному ходу, причому гранична маса конструкції не перевищує 32 т для перевезення по дорогах Європи.

Німецька компанія BAIDIN GmbH виробляє рейкозварювальні машини для контактного стикового зварювання рейок [12]. Основною продукцією цієї фірми є контейнерний комплекс на базі зварювальних головок K355AM, що кінематично ідентичні машині K900A та B120AC (рис. 9), яка конструктивно така ж як K920. Всі ці машини базуються на розробках ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Для живлення зварювальних трансформаторів тут застосовані силові інверторні перетворювачі, що здійснюють перетворення трьохфазної напруги дизель-генератора в однофазну синусоїдальну напругу з частотою 50 Гц. Це рішення, за словами виробника, забезпечує рівномірне, без перекосу фаз, навантаження на дизель-генераторну установку, і стабілізує напругу зварювальних трансформаторів. Зусилля осадки складає 1200 кН, а максимальне зусилля затиску 2800 кН. Маса зварювальної головки 3800 кг.

Універсальна головка для зварювання рейок A150DC по конструкції нагадує зварювальну го-

ловку ART1500R фірми Plasser & Theurer і відрізняється тим, що тут вісім циліндрів затиску, які розташовані друг напроти друга відносно поздовжньої вісі. Така компоновка дає змогу виконувати точну центровку рейок при затиску, тому що поршневі порожнини зустрічних циліндрів з'єднуються попарно. Оплавлення рейок в ній проводиться постійним струмом за допомогою двох випрямних вузлів. Хід циліндрів затискання 250 мм, що дає змогу виконувати операцію «останнього зварювання». Максимальне зусилля затиску 4000 кН, зусилля осадки 1500 кН. Вага зварювальної головки 4200 кг.

У 2019 р. на виставці RailLive 2019 демонструвався індукційний зварювальний апарат фірми **Mirage Rail**, який був розроблений для Network Rail Великобританія [13]. На відміну від контактної стикового зварювання при індукційному зварюванні торці рейок не нагріваються до рідкого металу, а зберігаються в твердому стані. Нагрів рейок здійснюється по всьому периметру токами магнітної індукції за допомогою індукторів. Енергоспоживання – 150 кВт·А.

Апарат складається з опори [14], куди вбудовані два модулі: рухомий та нерухомий. Кожен модуль включає три окремі затискні головки і дві головки вертикального підйому. Затискні та підйомні головки важільного типу з двоплечими важелями. При проектуванні апарата увага приділялася точному вирівнюванню рейок у трьох проекціях. Це необхідно для зменшення напруги у зварюваних рейках під час процесу. Після зварювання вбудований в апарат гратознімач, який рухається двома автономними гідроциліндрами, знімає грат.

Апарат призначений для зварювання рейок CEN 56 і 60. Час зварювання – 6 хв, маса установки 2200 кг (рис. 10).

Фірма «Псковелектросвар» (РФ) [15] представлена на ринку двома мобільними машинами: MPC-80.01 (рис. 11) і MPC-12001A (рис. 12), призначені для контактної стикового зварювання рейок типів P50 і P65 безперервним або пульсуючим оплавленням.

Машина MPC-80.01 [16] складається з нерухомого та рухомого корпусів. Кожен корпус містить силові та електродні важелі з різними важелевими системами. Силові важелі здійснюють затискання рейок. Зусилля затискання складає 2100 кН. Електродні важелі виконують центрування торців рейок і підведення струму до шийки рейки. Зусилля осадження складає 800 кН. Маса машини 3800 кг.

На відміну від MPC-80.01 у MPC 12001A [17] між силовими та електродними важелями встановлено механізм поєднання, важелі якого з'єднані з силовими важелями, а електроди мають можливість повертатися у двох проекціях, самовстановлюючись по шийці рейки та забезпечувати надій-

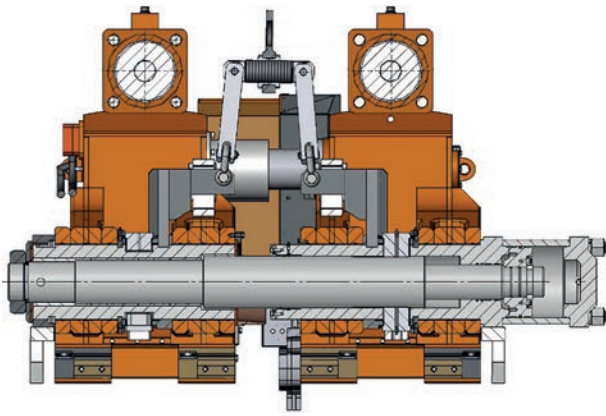


Рис. 13. Універсальна рейкозварювальна машина

ний електричний контакт. Механізм поєднання призначений для підвищення точності центрування рейок. Машина MCP-12001A може виконувати зварювання рейок з натягом зі зняттям ґрата безпосередньо після зварювання. Номінальне зусилля затискання складає 2800 кН, а зусилля осадки 1200 кН. Маса зварювальної головки складає 3750 кг.

Ці машини призначені для роботи в складі комплексів типу ПРСМ.

Авторам хотілося б звернути увагу читачів на нову розробку ІЕЗ ім. Є.О. Патона (рис. 13) [18]. Конструктивною особливістю цієї машини є те, що зменшено кількість вісей, з'єднуючих між собою затискні пристрої кліщового типу з трьох до одного, це дозволило зменшити кількість циліндрів осадки до одного. Зусилля осадки машини складає 65 кН. Машина позиціонується як машина для зварювання рейок у важкодоступних місцях, а також для зварювання рейок у пліті в польових умовах і на мобільних рейкозварювальних заводах. Цій машині потрібно всього 215 мм зазору до найближчої рейки, що дозволяє використовувати її навіть для зварювання стрілочних переводів.

Всі мобільні машини незалежно від виробника мають системи управління, які виконані на базі промислового комп'ютера і забезпечують завдання і контроль параметрів процесу зварювання з наданням оператору поточної інформації про технологічний процес зварювання з подальшою видачою паспорта на кожен зварений стик. Одночасно на вбудованому ПК архівуються результати зварювальних робіт.

Таким чином, сучасна технічна продукція набуває рис інвестиційного проекту і перед проектувальником стоїть завдання не тільки створення нового обладнання, а й оптимізація витрат на всі етапи отримання продукції, як то конструювання, розробка, виготовлення. Аналіз накопиченого досвіду проектування і експлуатації зварювальних машин дозволяє намітити подальші шляхи вдосконалення і розвитку конструкцій обладнання з урахуванням і економічної складової.

Висновки

1. Тенденцією розвитку світового ринку рейкозварювальних машин є збільшення частки мобільного устаткування для застосування у польових умовах при будівництві та ремонті залізничних колій.

2. Мобільні машини для зварювання рейок різняться кінематичною схемою, за якою проводять затиск і осадку, центруванням та способом нагріву рейок. Кожне технічне рішення має свої переваги і недоліки.

3. Основні конструктивні рішення мобільних рейкозварювальних машин, які представлені на ринку, розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і використовуються вітчизняними та закордонними виробниками цієї галузі, кожен з яких удосконалює окремі вузли та механізми з метою розширення технологічних характеристик.

4. Новітня розробка ІЕЗ ім. Є.О. Патона в галузі мобільних рейкозварювальних машин позиціонується як машина для зварювання рейок у важкодоступних місцях, а також для зварювання рейок у пліті в польових умовах і на мобільних рейкозварювальних заводах.

Список літератури

1. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 4-12 DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>.
2. <https://www.qyresearch.com/index/detail/2731611/global-rail-welding-machines-market/toc>
3. EN 14587-2:2009. *Railway applications – Track – Flash butt welding of rails. Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant*. European Committee for standardization.
4. Каховський завод електросварочного обладнання. Каталог продукції. <https://kzes.com>
5. ЦП-0266 «Технічні вказівки по улаштуванню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України».
6. Кучук-Яценко С.І., Сахарнов В.О., Кривенко В.Г., Порхун Ф.К., Богорський М.В., Головачов В.М. Машина для контактного стикового зварювання рейок. Пат. Україна UA56986C2.
7. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, **11-12**, 25-40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>
8. <https://www.schlattergroup.com/en/welding-machines/flash-butt-welding-machines-for-rails>
9. *Flash butt welding facility*. Hansrudof Zollinger, Geroldswil, Switzerland, assignor to H. A. Schlatter AG, Schlieren, Switzerland. USA Pat. US5,389,760.
10. <https://www.plassertheurer.com/en/machines-systems/infrastructure/industrial-railways/infrastructure/save>
11. Fheurer, J., Zichtberger, B., Mühlleither, H. *Welding rails of a track*. USA Pat. US8735761B2.
12. <https://baidin-gmbh.com/>
13. <https://www.mirageservices.co.uk/>
14. Birks, Kevin Finemore, Mark Ross Mountford, Nicholas John. *Railway rail induction-welding device*. USA Pat. US2019330805A1.
15. http://pskovelectrosvar.ru/products/0_30/
16. Кризский В.М., Журавлев С.И., Сударкин Ф.Я. Машина подвесная для стыковой сварки рельсов. Пат. Россия RU2748185C1.

17. Кризский В.М., Жуков С.А., Зимин И.Н., Булочников Р.А., Вальков В.В., Кожевников Е.В. *Машина подвесная для стыковой сварки рельсов*. Пат. Россия RU2321478C2.
18. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Krivenko, V.G., Didkovskiy, A.V., Koval, M.Y., Levchuk, A.N. *Machine for flash-butt welding of rails*. USA Pat. US 10,131,014 B2.

References

1. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, 5-6, 4–12 DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>.
2. <https://www.qyresearch.com/index/detail/2731611/global-rail-welding-machines-market/toc>
3. EN 14587-2:2009. *Railway applications – Track – Flash butt welding of rails. Pt 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant*. European Committee for standardization.
4. *Kakhovsky Plant of Electric Welding Equipment. Catalog of products*. <https://kzes.com>
5. TsP-0266: *Technical instructions for the arrangement, repair and maintenance of seamless track on the railways of Ukraine* [in Ukrainian].
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Sakharov, V.O., Kryvenko, V.G., Porkhun, F.K., Bogorskiy, M.V. *Machine for flash-butt welding of rails*. Pat. Ukraine UA56986C2 [in Ukrainian].
7. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, 11-12, 25–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>
8. <https://www.schlattergroup.com/en/welding-machines/flash-butt-welding-machines-for-rails>
9. *Flash butt welding facility*. Hansrudof Zollinger, Geroldswil, Switzerland, assignor to H. A. Schlatter AG, Schlieren, Switzerland. USA Pat. US5,389,760.
10. <https://www.plassertheurer.com/en/machines-systems/infrastructure/industrial-railways/infrastructure/save>
11. Fheurer, J., Zichtberger, B., Mühlleither, H. *Welding rails of a track*. USA Pat. US8735761B2.
12. <https://baidin-gmbh.com/>
13. <https://www.mirageservices.co.uk/>
14. Birks, Kevin Finnemore, Mark Ross Mountford, Nicholas John. *Railway rail induction-welding device*. USA Pat. US2019330805A1.
15. http://pskovelectrosvar.ru/products/0_30/
16. Krizsky, V.M., Zhuravlev, S.I., Sudarkin, F.Ya. *Suspended flash-butt rail welding machine*. Russia Pat. RU2748185C1
17. Krizsky, V.M., Zhukov, S.A., Zimin, I.N., Bulochnikov, R.A., Valkov, V.V., Kozhevnikov, E.V. *Russia Pat. RU2321478C2* [in Russian].
18. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Krivenko, V.G., Didkovskiy, A.V., Koval, M.Y., Levchuk, A.N. *Machine for flash-butt welding of rails*. USA Pat. US 10,131,014 B2.

DESIGN FEATURES OF MOBILE RAILWAY WELDING MACHINES FOR FLASH BUTT WELDING

D.I. Malysheva, N.A. Vinogradov, V.Y. Sysoev

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

E-mail: dep26kb@paton.kiev.ua

The design features of mobile rail welding machines for flash butt welding produced by companies, operating in the modern world market were studied. The studies provide an opportunity to highlight the trends of further improvement of equipment with the growth of technological innovations. 18 Ref., 13 Fig.

Keywords: seamless track, flash butt welding of rails, rail welding machine, upsetting, upsetting force, clamping, clamping force, continuous melting, pulsating flashing, device for burr removal, current supply

Надійшла до редакції 24.12.2021

Гортаючи старі номери

Новини піввікової давнини

1971

Конференція з електронно–променевого зварювання

Київ, 14–15 жовтня 1971 р. відбулася третя конференція з електронно–променевого зварювання, організована Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона та Московським енергетичним інститутом. У її роботі взяли участь 215 делегатів, які представляли понад 120 різних організацій та промислових підприємств.

У рішенні конференції зазначається, що для широкого впровадження електронно–променевого зварювання у масове та великосерійне виробництво насамперед необхідно розробити техніку та принципову технологію зварювання широкого кола конструкційних сталей різної товщини; автоматизувати процес зварювання та підвищити надійність існуючого та обладнання, що розробляється, створити високопродуктивні автомати для зварювання виробів із конструкційних сталей; розробити технологічні прийоми для зниження вимог до точності підготовки виробів під зварювання.

Рекомендовано підготувати у 1972 р. до видання керівні міжгалузеві технологічні матеріали з електронно–променевого зварювання.

О.К. Назаренко

Семінар зі зварювання пластмас

Київ. 7–10 вересня 1971 р. відбувся семінар на тему «Досягнення в галузі зварювання пластмас», організований Будинком науково-технічної пропаганди та комісією «Зварювання пластмас» Наукової ради з проблеми «Нові процеси зварювання та зварні конструкції». У роботі семінару взяли участь понад 150 представників науково-дослідних, навчальних інститутів та інших організацій.

Відкриваючи семінар, член-кор. АН УРСР В.К. Лебедев (ІЕЗ) дав оцінку стану та перспектив застосування зварювання пластмас у народному господарстві.

Було заслухано та обговорено 26 доповідей та повідомлень, присвячених різним способам зварювання пластмас, окремим питанням технології зварювання термо- та реактопластів, вивченню теплових процесів при зварюванні, створенню нового обладнання.

Для делегатів було організовано екскурсію до ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Інформація, отримана учасниками семінару, сприятиме новим успіхам у галузі зварювання пластмас.

І.Ф. Істратов

ДОСВІД АТЕСТАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

О.С. Косторной, М.О. Лактіонов

АТ «Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного і енергетичного насособудування». 40003, м. Суми, вул. 2-а Залізнична, 2. E-mail: www.vniiaen.sumy.ua

Атестація зварювальних процесів стала невід'ємною частиною систем забезпечення якості продукції. Вітчизняні виробники проводять атестацію залежно від вимог контракту за трьома напрямками по стандартам: ASME, ISO та Правила АЕУ. Методики атестації і переатестації суттєво різняться. Процеси освоєння атестації технології зварювання за міжнародними стандартами потребують часу та кваліфікованого персоналу.

Ключові слова: атестація зварювальних процесів, методики, стандарти: ДСТУ, ISO, EN, ASME

У термінології стандартів систем якості **зварювання** вважається **спеціальним** процесом. Стандарти системи якості вимагають, щоб спеціальні процеси виконувались відповідно до документованих технічних вимог. Технічні вимоги до процедури зварювання необхідні, щоб забезпечити чітко встановлену основу для планування процедур зварювання та управління якістю під час зварювання, тобто забезпечити необхідну основу для відповідності зварних швів вимогам, що висуваються до них. Атестація процедур зварювання є невід'ємною нормою систем забезпечення якості, міжнародних стандартів по зварювальному виробництву, галузевих нормативних документів (ДСТУ, ISO, EN, ASME, API, Європейських директив, Правил АЕУ тощо) та стала безумовною вимогою замовників до виготовлення відповідальних зварних конструкцій. В даний час вітчизняні підприємства проводять атестацію технології зварювання залежно від вимог контракту **за трьома напрямками: ASME, ISO та Правила АЕУ.**

У світовій практиці атестація зварювальних процесів стала невід'ємною частиною промислового виробництва. У США та низці інших регіонів Америки та Азії широко застосовуються норми та вимоги до зварювального виробництва за стандартами AWS (Американське товариство зварників), ASME (Американське товариство інженерів механіків), API (Американський інститут нафти) та ін. Ці організації мають свої комітети, підкомітети та секції, які розробляють та раз на 3-5 років перевидають нормативні документи (НД), які обумовлюють вимоги до різних аспектів зварювального виробництва: персонал, зварювальне обладнання та матеріали, технології, норми оцінки якості тощо. Вимоги та норми щодо процедур атестації технології зварювання та зварювальників викладені у IX секції ASME та в деяких галузевих стандартах.

У країнах об'єднаної Європи в галузі атестації технології зварювання діють стандарти: європейський EN-288 та міжнародний ISO 9956. Нині вони замінені

на серію міжнародних стандартів – ISO 15607 ... ISO 15614. В Україні діяв стандарт ДСТУ 3951-2000, гармонізований з ISO 9956 та EN 288, який також замінено на відповідні ідентичні міжнародні стандарти: ДСТУ ISO 15607 ... ДСТУ ISO 15614.

На вітчизняних теренах атестацію технології зварювання було регламентовано для атомної енергетики Правилами АЕУ-ПНАЕ Г 7-008-89, ПНАЕ Г-7-009-89, ПНАЕ Г-7-010. Наразі колишні правила АЕУ замінені на нові норми і правила – НП 306.2.227-2020, СОУ НАЕК 158-2020, СОУ НАЕК 159-2020, СОУ НАЕК 160-2020 та ін. Технічні норми з колишніх Правил АЕУ практично перенесені в нову нормативну базу. Наразі вимоги Правил АЕУ до атестації технології зварювання значно відрізняються від норм і положень стандартів ISO та ASME (AWS).

Технічна сторона стандартів з атестації процесів зварювання секції IX ASME та ISO 15614 відрізняються незначною мірою як за методикою виконання, так і по області розповсюдження. Є розбіжності у вимогах по механічним випробуванням, по застосуванню неруйнівних способів контролю. Термін дії атестації за нормами ASME **необмежений**, за винятком випадків погіршення якості. Атестація по ASME виконується підприємствами **самостійно**, при цьому дотримується вимога, що процедури атестації зварювання (WPS) та протоколи, що підтверджують результати атестації (PQR), виконуються у суворій відповідності до секції IX ASME та повинні бути надані технічному інспектору на перший його запит. На вимогу конкретного замовника WPS та PQR узгоджуються чи затверджуються третьою стороною – замовником чи його представником.

У стандартах ISO 15607 ... ISO 15614 відображено, що атестація технології зварювання може виконуватись за участю третьої сторони на вимогу замовника. Галузева НД, зокрема Директива 2014/68 EU щодо обладнання, що працює під тиском, уточнюють вимоги до атестації технології зварювання. Зокрема, за умови проставлення тав-

ра «СЄ» на обладнання, призначене для експлуатації в межах європейської спільноти, процедура атестації зварювання має виконуватися обов'язково за участю Уповноваженого органу. Термін атестації **5 років**. Незважаючи на відмінності в системах атестації з ASME та ISO, є дані щодо взаємного зближення та визнання результатів атестації. Так, у стандарті API-6D 2014 р. зазначається, що атестацію технології зварювання можна виконувати або за вимогами ASME, або за ISO. На практиці замовники часто дозволяють робити вибір системи атестації виробнику. Природно, що фахівці підприємств вибирають систему ASME як простішу.

Замовників насамперед цікавить функціонування системи менеджменту якості – ISO 9001 (API Q1 та ін.), а в галузі зварювального виробництва – сертифікація за ISO 3834. У процесі сертифікації персонал освоює НД, розробляє та впроваджує внутрішні стандарти, що дозволяють підняти рівень виробництва до міжнародних вимог. В Україні сертифікацію ISO 3834 виконує ліцензований орган БАТ «ПАТОНСЕРТ». Ця організація може виконувати функції третьої сторони під час атестації технології зварювання. Атестовані процедури зварювання за участю третьої сторони викликають у замовника більшу довіру та схвалення.

Стандарти США (ASME, AWS) декларують принцип, що вони не можуть замінити освіту, досвід та інженерну оцінку. Ті аспекти робіт, які не зазначені у стандартах, не слід вважати забороненими. Інженерна оцінка повинна узгоджуватися з принципами стандартів і такі оцінки ніколи не повинні спростовувати чи скасовувати вимоги або спеціальні заборони, які є у стандартах. Розробники стандартів ASME, API, AWS не несуть відповідальності та не приймають претензій щодо точності та повноти інформації, а також за використання будь-якої інформації чи процесу, представлених у нормативній документації. Стандарти видаються для широкого поширення випробуваних практично, обґрунтованих технічних і технологічних методів.

Котли та посудини тиску, які виготовлені відповідно до всіх застосовних правил стандартів ASME, можуть маркуватися клеймом з офіційним символом ASME. Для цього необхідно виробнику пройти процедури, встановлені ASME, AWS та отримати відповідний Сертифікат ASME. Трубопровідна арматура, насоси можуть маркуватися клеймом API за умов повної відповідності виготовлення стандартам API, AWS та отримання виробником Сертифіката API за встановленою процедурою. У процесах атестації процедур зварювання **бере участь технічний інспектор ASME або API**. Через кожні 3 роки необхідно підтверджувати Дозволи та Сертифікати.

Складні відповідальні металоконструкції на вимогу замовника виготовляються відповідно до

норм AWS D1.1/D1.М «Стандартні вимоги до зварювання будівельних конструкцій – сталеві конструкції». У стандарті дохідливо викладені вимоги до основних та зварювальних матеріалів, до конструкції зварних з'єднань, до перевірки та атестації технологічних процесів зварювання, до контролю якості зварних з'єднань та системи менеджменту якості, до атестації персоналу – зварювальників та контролерів. В AWS D1.1/D1.М **своя методика атестації зварювальних процесів**.

Ремонт чавунного литва деякі виробники виконували на вимогу замовника відповідно до норм стандарту ANSI/AWS D11.2 «Посібник зі зварювання ливарного чавуну». У даному Керівництві викладається відносна зварюваність різних типів чавуну, розглядаються присадні матеріали та зварювальні процеси, наведені спеціальні вимоги щодо **атестації процедур зварювання чавуну та зварювальників**.

У практиці виробників обладнання за міжнародними стандартами було кілька варіантів взаємодії із замовником. Найпростіший варіант — виготовлення за визначеними стандартами, замовник бере участь у приймальних випробуваннях. Другий варіант – вибіркове здійснення нагляду за виготовленням обладнання представником замовника. За третім варіантом здійснюється повний контроль виготовлення виробів наглядовими органами замовника.

Перед укладанням контрактів зазвичай замовник виконує аудит підприємства, де звертається основна увага на такі фактори:

- наявність сертифікованої системи менеджменту якості (СМЯ) – зазвичай за ISO 9000 або API Q1;
- наявність Керівництва з якості (КЯ) та Програми забезпечення якості (ПЯ);
- документування процесів, простежуваність, ідентифікація;
- функціонування системи Планів якості на кожен виріб;
- сертифікація зварювального виробництва за ISO 3834 (бажано);
- навчання та атестація персоналу зварювального виробництва – зварювальників, контролерів (інспекторів) з неруйнівних видів контролю, керівників зварювальних робіт;
- контроль, зберігання, видача та використання зварювальних матеріалів;
- періодичні перевірки зварювального обладнання та обладнання для руйнівних та неруйнівних методів контролю;
- система атестації зварювальних процесів згідно з наведеними вище нормативними документами.

Усі стандарти обумовлюють необхідність атестації процесів зварювання (або переатестації) у разі зміни суттєвих змінних: способу зварювання, групи марок основного металу, зварювальних

матеріалів, зварюваних товщин та діаметрів, наявність (відсутність) підігріву або термообробки та ін. Істотними вважаються зміни, що вплинуть на механічні властивості. Зміни в умовах зварювання, які вплинуть на ударну в'язкість зварного з'єднання, є істотними додатковими змінними. У стандартах кожного способу зварювання призначені істотні, додаткові істотні і несуттєві змінні параметри.

В стандартах ASME та AWS для підпорядкованих виробів наведено дозволені до застосування марки основних матеріалів, їх хімічний склад та механічні властивості. Ці матеріали згруповані за окремими Р-номерами, на які потрібна окрема атестація. Застосування інших матеріалів (відсутніх в таблицях стандартів) можливе за погодженням із замовником. У такому випадку маркування виробу тавром ASME (API) виключено і атестація зварювальних процесів розповсюджується тільки на конкретну марку матеріалу. В стандарті ISO 15608 сталі згруповані в рамочних межах по хімічному складу та по механічним властивостям без конкретизації марок, що більш прийнятно для вітчизняного виробництва.

В стандартах ASME, AWS, ISO наведено рекомендовані примірники оформлення WPS (Процедура зварювання) і PQR (Протокол підтвердження процедури зварювання). Форми не обов'язкові, але наведено перелік параметрів зварювання, які необхідно відображати у WPS та PQR. Додаток до PQR – усі відомості на основні та зварювальні матеріали, відомості про неруйнівні та руйнівні методи контролю, маршрутні листи виконання контрольних зварних з'єднань, відомості про термообробку тощо. Процедури зварювання (WPS) мають бути на робочих місцях. Протоколи PQR зберігаються у персоналу, призначеного згідно з Керівництвом з якості. PQR та WPS повинні бути надані на першу вимогу інспектора. Зазвичай, виробники виконують WPS та PQR у двомовній формі – вітчизняній та англійській, що спрощує спілкування з англомовною інспекцією.

Наразі Україною взято курс на освоєння стандартів міжнародних (ISO) та європейських (EN). В Україні видано понад 150 стандартів ДСТУ/ISO або ДСТУ/EN у галузі зварювального виробництва. Більшість цих стандартів є ідентичним перекладом. На жаль, частина стандартів не має перекладу – оригінальний текст англійською мовою та обкладинка під назвою українською. Такі обставини **не сприяють** впровадженню міжнародних стандартів в українську промисловість. Безпосередньо вимоги щодо атестації технології зварювання викладені у ДСТУ/ISO 15607...ДСТУ/ISO 15614.

Загальна вимога всіх стандартів – атестація процедур зварювання має бути проведена виробником до виконання зварювання у виробництві. Вироб-

ник виконує атестацію самостійно. Наказом на підприємстві призначається експерт та/або експертний орган для перевірки виконання атестації та її відповідності стандартам. У певних випадках може бути потрібний зовнішній незалежний експерт або незалежний експертний орган. Зазвичай це на вимогу замовника або за галузевими нормами.

ДСТУ/ISO 15607 визначає загальні правила розробки та атестації процедур зварювання. У ньому також наведено посилання на **п'ять** можливих методів атестації технології зварювання. На відміну від вимог ASME введено поняття попередніх технічних вимог до процедури зварювання (pWPS), які після підтвердження Протоколами WPQR переходять у статус WPS.

ДСТУ/ISO/TR 15608 групує основні матеріали з точки зору області поширення атестації технології зварювання. Стандарт стосується сталей, чавуну, кольорових металів та їх сплавів: алюмінію, міді, нікелю, титану та цирконію.

ДСТУ/ISO 15609-1 встановлює технічні вимоги до процедури дугового зварювання (WPS). У стандарті наведено параметри, які мають відображатися у WPS, а також рекомендована форма WPS.

ДСТУ/ISO 15610 деталізує **атестацію, засновану на випробуваннях зварювальних матеріалів**. Метод може бути використаний при застосуванні матеріалів, властивості яких у зоні термічного впливу значно не погіршуються. Стандарт не застосовується там, де для зварного з'єднання встановлені вимоги щодо твердості, ударної в'язкості, підігріву, погонної енергії, термообробки та ін. в межах товщини 3...40 мм; зварювальні матеріали певних марок та конкретних виробників. WPS та WPQR повинні бути оформлені з урахуванням вимог ДСТУ/ISO 15609-1 та підписані експертом або експертним органом.

ДСТУ/ISO 15611 регламентує другий **метод атестації, заснований на досвіді раніше виконаного зварювання**. Виробник може мати WPS, атестовані шляхом посилання на досвід раніше виконаного зварювання, якщо він може довести відповідність та достовірність документів незалежного характеру, що ним у попередній період були успішно зварені дані типи з'єднань і матеріалів.

ДСТУ/ISO 15612 – вимоги **методу атестації шляхом прийняття стандартної процедури зварювання**. Стандартна процедура зварювання повинна бути опублікована у формі WPS та/або WPQR, заснованих на атестації згідно з ДСТУ/ISO 15614. Розроблені виробником WPS є атестованими, якщо діапазони всіх параметрів знаходяться в області, що охоплюється стандартною процедурою зварювання. Стандарт ДСТУ/ISO 15612 єдиний, що надає виробнику можливість використання процедур зварювання на базі ви-

пробувань, проведених іншими організаціями. Обмеження щодо застосування методу: обов'язкове дотримання вимог ДСТУ/ISO 15607, EN719, EN729, зварювальне обладнання аналогічне для атестації стандартної процедури зварювання. Всі записи, на яких базується атестація, повинні простежуватися до першоджерел протягом усього періоду її дії. Ці обставини ставлять під сумнів можливість використання WPS та WPQR, атестованих іншим підприємством.

ДСТУ/ISO 15613 – атестація процедур зварювання шляхом передвиробничих випробувань зварювання. Цей метод є єдиним надійним для специфічних зварних з'єднань, коли граничні умови, тепловідведення тощо. неможливо відтворити стандартними контрольними зразками. Підготовку та зварювання конкретних зразків слід виконувати в умовах зварювання продукції, яку вони мають відтворювати своєю формою та розмірами. При цьому необхідно максимально виконувати вимоги ДСТУ/ISO 15614. Виконання до зварювання виробів контрольних зварних з'єднань (КЗЗ) є неодмінною вимогою галузевих стандартів, у тому числі НПАОП України. Тому у виробників склалася практика при виконанні КЗЗ відповідно до вимог галузевих нормативних правил передбачати всі необхідні випробування для оформлення WPQR.

Ризики, пов'язані із застосуванням вище наведених методів атестації процедур зварювання полягають в тому, що вони мають обмеження щодо застосування та технічного інспектора можуть не задовольнити задокументований обсяг даних минулого досвіду та повнота їх відповідності ДСТУ/ISO 15609. З цієї причини виробники **надають перевагу атестації технології зварювання шляхом зварювання та випробування стандартного контрольного зразка згідно ДСТУ/ISO 15614.**

В ДСТУ/ISO 15614 детально викладено норми кваліфікації WPS за допомогою випробування зварювальних процедур, а також область розповсюдження зварювальних процедур для будь-якої практичної діяльності в межах діапазону параметрів впливу. У стандарті наведено вимоги до форми та розміру контрольних зразків, до положень зразка при зварюванні, визначено обсяги неруйнівних та руйнівних випробувань, критерії оцінки. Докладно викладено норми по області розповсюдження атестованих технологій залежно від наступних умов: способів зварювання, видів зварних з'єднань, основних та зварювальних матеріалів, зварюваних товщин і діаметрів, позиції виробу, що зварюється, погонної енергії зварювання, температури попереднього підігріву та подальшої термообробки.

Загальна вимога всіх стандартів – атестація процедур зварювання має бути проведена виробником

до виконання зварювання у виробництві. Виробник виконує атестацію самостійно. Наказом на підприємстві призначається експерт та/або експертний орган для перевірки виконання атестації та її відповідності стандартам. У певних випадках може бути потрібний зовнішній незалежний експерт або незалежний експертний орган. Зазвичай це на вимогу замовника або за галузевими нормами. Таким чином для виготовлення продукції за міжнародними та американськими стандартами персоналу підприємства необхідно орієнтуватися у вимогах наведеної вище нормативної документації та відповідно вибудовувати виробничий процес. Основне навантаження лягає на фахівців зварювального виробництва та на персонал системи менеджменту якості. Слід зазначити, що стандарти складні для сприйняття і вимагають великих витрат часу на освоєння. Стримуючим фактором є і відомі складності із забезпеченням вітчизняної промисловості актуалізованими стандартами (як зовнішніми так і внутрішніми). В Україні великі складнощі з НД зі зварювального виробництва для різних галузей господарювання. В даний час потрібна координація дій, плани перегляду та доопрацювання численного масиву НД. Для вирішення цих проблем згідно міжнародної практики необхідно вагомо підвищити роль та вплив **Товариства Зварювальників України.**

Висновки

1. З метою забезпечення конкурентоспроможності своєї продукції фахівцям зварювального виробництва необхідно опановувати світові стандартні норми.

2. Замовники визначають нормативні вимоги до своєї продукції або за американською системою стандартів (ASME, API, AWS) або за міжнародною (ISO, EN). Атестація процедур зварювання – невід'ємна частина всіх систем управління якістю.

3. В Україні впроваджуються в галузі зварювального виробництва десятки ДСТУ/ISO/EN, які є ідентичними перекладами з англійської мови. Атестація процедур зварювання згідно серії ДСТУ/ISO 15607...ДСТУ/ISO 15614.

4. За системою ДСТУ/ISO є п'ять методик атестації технології зварювання. Чотири з них на перший погляд простіші, але є ризики, що їх результати можуть бути не прийнятні для уповноваженого інспектора. Тому виробники надають перевагу атестації технології зварювання шляхом зварювання та випробування стандартного контрольного зразка згідно ДСТУ/ISO 15614.

5. Процеси освоєння атестації технології зварювання за міжнародними стандартами потребують часу та кваліфікованого персоналу.

Надійшла до редакції 10.01.2022

КОНФЕРЕНЦІЯ З ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ В ХІРУРГІЇ

25–26 листопада 2021 р. в режимі онлайн відбулася XXI Науково-практична конференція з міжнародною участю «Клініко-технологічні виклики в етапній та реконструктивній хірургії. Вогнепальні та побутові рани, електрозварювання та з'єднання живих тканин», в якій Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона виступав в якості співорганізатора разом з Національним університетом охорони здоров'я України ім. П.Л. Шупіка.

В перший день роботи конференції відбулася секція «Електрозварювання в хірургії». Перед початком цієї секції з вітальним словом до учасників конференції звернувся директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік І.В. Кривцун. В своєму виступі він відмітив, що даний напрямок є класичним прикладом технологій, які виникли на стику двох різних галузей науки – в даному випадку медицини та електрозварювання. І саме в тісній взаємодії фахівців і ентузіастів кожної з них лежить запорука успіху. Він закликав учасників до співпраці та відзначив, що зварювання і споріднені технології, крім традиційного їхнього використання для з'єднання та обробки конструкційних і функці-

нальних матеріалів, знаходять все більш широке застосування в медицині. Саме використання безмежних можливостей нових технологій з метою охорони здоров'я людей, а також збереження довкілля в даний час є одним із пріоритетних напрямків наукових досліджень Інституту.

На секції були представлені практичні матеріали з питань електрозварювання в загальній хірургії, пульмонології та проктології. Доповідачі відмітили переваги нового методу в порівнянні з традиційними, а також добрі перспективи його подальшого розвитку. Нами була представлена доповідь, присвячена новітньому обладнанню ІЕЗ для з'єднання та обробки живих тканин. Наведені експериментальні дані, які свідчать про суттєве поліпшення показників процесу завдяки використанню нових обладнання та програмного забезпечення, що уможливили реалізацію нових алгоритмів. Представлені зразки обладнання наступного покоління, в тому числі перспективного та експериментального, що базуються на принципово нових підходах до процесів зварювання та обробки живих тканин.

Д.т.н. Г.С. Маринський,
ІЕЗ ім. Є.О. Патона

ВІДКРИТТЯ ПАМ'ЯТНИКА АКАДЕМІКУ Б.Є. ПАТОНУ НА БАЙКОВОМУ КЛАДОВИЩІ

27 листопада 2021 р., у день народження багаторічного директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, президента Національної академії наук України академіка Бориса Патона відбулося урочисте відкриття пам'ятника цьому легендарному науковцю на Байковому кладовищі у Києві.

На заході були присутні колеги, друзі, члени родини Бориса Євгеновича.

Право відкрити пам'ятник було надано президенту НАН України академіку Анатолію Загородньому та онуці Бориса Євгеновича – Ользі.



Із теплими словами про Бориса Євгеновича та його людські якості і величезну наукову спадщину виступили президент НАН України академік Анатолій Загородній, голова Комісії НАН України з питань увічнення пам'яті Бориса Патона академік Антон Наумовець, заступник керівника Офісу Президента України Олексій Дніпров, заступник міністра освіти і науки України з питань європейської інтеграції Олексій Шкуратов, директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона академік Ігор Кривцун, ректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» академік Михайло Згуровський, президент Національної академії педагогічних наук України академік Василь Кремень та генеральний директор ДП «Антонов» член-кореспондент Сергій Бичков.

Автор пам'ятника – відомий скульптор, заслужений художник України Костянтин Добрянський. Пам'ятник виконано в класичному академічному стилі за рахунок добровільних внесків до Благодійного фонду імені Бориса Патона при Президії НАН України.

Редакція журналу

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РОБОТИ НТЦ «ПРОМАВТОСВАРКА» У ГАЛУЗІ МЕТАЛІЗАЦІЇ

Електродугова металізація (ЕДМ) як різновид газотермічних технологій нанесення покриттів є одним із способів обробки поверхні матеріалів, що застосовується в різних галузях промисловості вже кілька десятиліть. Основне призначення покриттів, отриманих способом ЕДМ, полягає в отриманні на поверхні об'єкта тонкого шару матеріалу з особливими властивостями (корозійна стійкість, антифрикційні властивості, висока твердість та зносостійкість, жаростійкість тощо). При цьому якість покриття повинна відповідати вимогам Замовника та нормативно-технічної документації, відповідно до якої здійснюється виготовлення чи ремонт деталі (вузла, конструкції).

Як правило, якість покриття контролюється на технологічних зразках-свідках, що виготовляються на етапі відпрацювання технології та підготовки виробництва і включає наступні процедури:

- візуальний огляд поверхні покриття на предмет однорідності покриття та відсутності зовнішніх дефектів (сколів, відшарування, здуття, тріщин, пор);
- визначення величини адгезійної міцності зчеплення покриття з матеріалом основи;
- визначення процентного вмісту мікропор за товщиною металізаційного шару;
- замір твердості покриття;
- металографічні дослідження структури металізаційного покриття;
- проведення спеціальних випробувань (наприклад, визначення стійкості газоабразивному зносу, опір механічному стиранню та ін.).

Науково-технологічний центр «Промавтосварка», який є розробником та виробником обладнання для електродугової металізації (рис. 1), паралельно з роботами з удосконалення конструкції металізаторів, спільно з ІЕЗ ім. Є.О. Патона проводить пошукові роботи з відпрацювання технології нанесення покриттів із застосуванням різних за складом зварювальних та наплавлювальних дрітів.

Слід зазначити, що дослідні роботи проводилися з метою використання результатів випробувань

для вирішення конкретних проблем, що існують у реальному промисловому виробництві, а саме:

- збільшення терміну міжремонтної експлуатації металоконструкцій за рахунок нанесення на поверхню шару протекторного захисту відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2-6.193-2013 (напилення цинку, рис. 2);



Рис. 2. Опора кріплення обладнання мобільного зв'язку



Рис. 3. Вкладиш підшипника живильного насосу ТЕЦ до ремонту

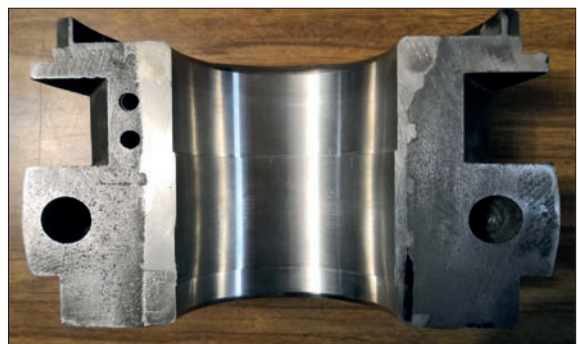


Рис. 4. Вкладиш підшипника живильного насосу ТЕЦ після ремонту, проведеного методом електродугової металізації



Рис. 1. Комплекс для дугової металізації КЕМ-1



Рис. 5. Фрагмент поверхні охолодження котла-утилізатора

- створення ефективної технології ремонту локальних дефектів антифрикційного шару підшипників рідинного тертя (рис. 3 та рис. 4);
- збільшення ресурсу роботи газоохолоджувального обладнання в металургійному виробництві за рахунок нанесення на поверхні теплообміну, схильних до газоабразивного зносу, зносостійкого шару на основі карбідів і карбонітридів (рис. 5).

Досліджені зразки піддавалися різним випробуванням в акредитованих лабораторіях. Починаючи з 2018 р., випробування дослідних зразків проводилися у наступних організаціях:

1. ДП «НДІ високої напруги», м. Слов'янськ – випробування на міцність зчеплення цинкового покриття з металом основи. Випробування проводилися методом нагрівання згідно з ГОСТ 9.307-89 (п.4.4.3) «Цинкові покриття гарячі. Загальні вимоги та методи контролю» та ГОСТ 9.302-88 (п.5.9) «Покриття металеві та неметалеві. Методи контролю».

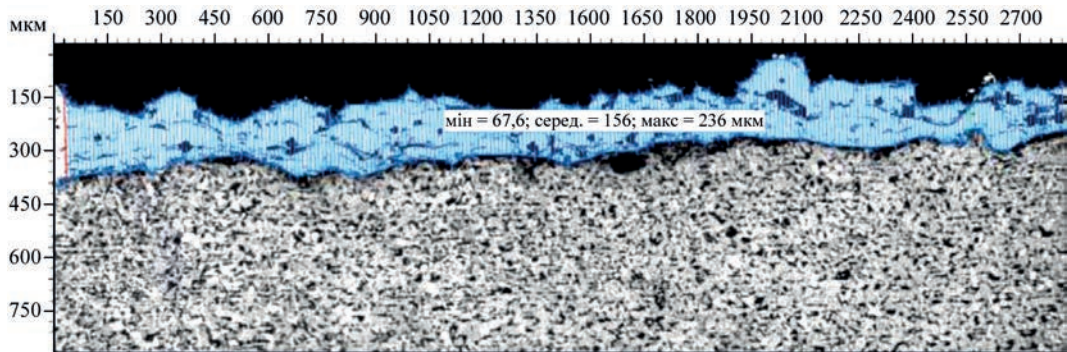


Рис. 6. Мікроструктура шару зі сплаву ПП-Нп 80Х20Р3Т-С (×100)

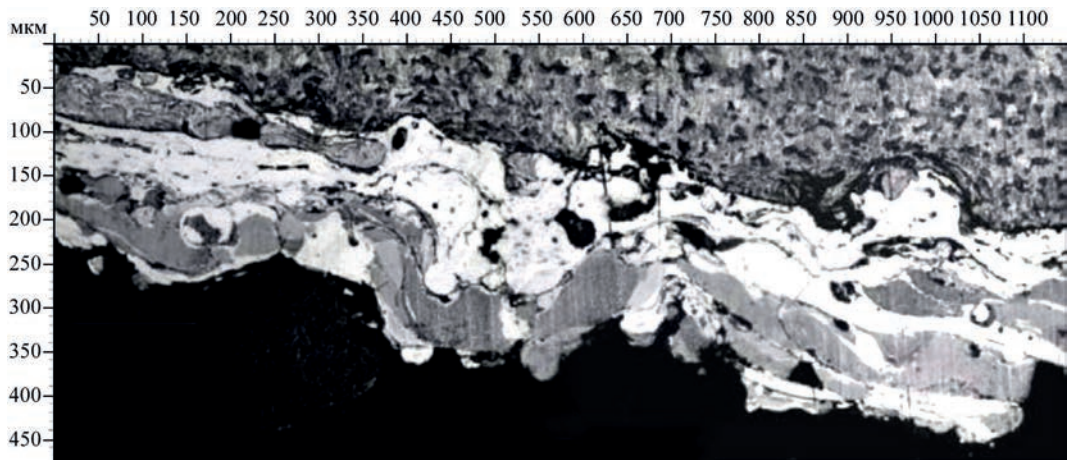


Рис. 7. Мікроструктура шару зі сплаву ПП-Нп 80Х20Р3Т-С (×200)

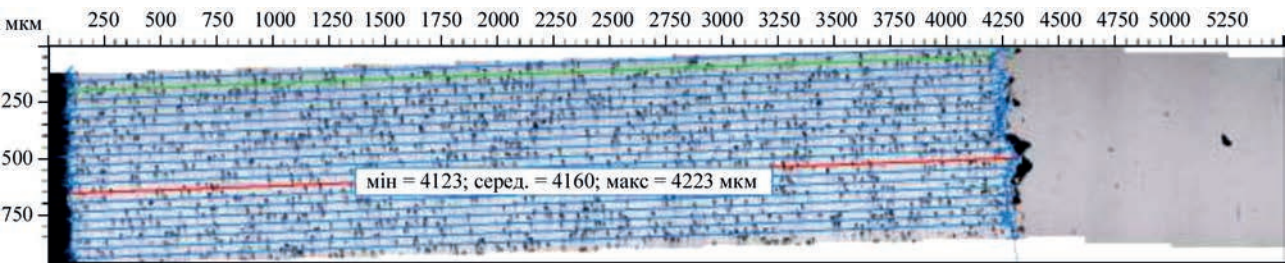


Рис. 8. Мікроструктура шару зі сплаву StSb8Cu4 (×100)

Огляд зразків, проведений після випробувань, відшарування, сколів та здуття не виявив.

2. Центр незалежних досліджень ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ», м. Харків – металографічні дослідження покриттів з визначенням структури напиленого шару, мікротвердості та об'ємного вмісту мікропор. Дослідження проводилися на зразках, виготовлених із застосуванням дротів (рис. 6–8) ESAB Stooddy 160FS, ПП-Нп 80X20P3T-C, 06X19H9T та StSb8Cu4 ISO 4383.

На всіх досліджуваних зразках відсотковий вміст мікропор у напиленому шарі становив не більше 4...8 %.

3. ІЕЗ ім. Є.О. Патона, відділ захисних покриттів (відділ № 73) – випробування на адгезійну міцність за клейовою методикою згідно з ISO 14916-2017 «Термічне напilenня. Визначення міцності зчеплення при розтягуванні».

Підсумкова таблиця результатів випробувань на адгезійну міцність

Вид підготовки поверхні	Марка матеріалу покриття	Товщина по- криття (середня)	Номер зразку	Зусилля відриву, Н	Міцність зчеплення, МПа	Характер відриву
Струменево-абразивна обробка чавунним коло- тим дробом	Підшар – алю- мінієва бронза Основний шар – ПП-Нп 80Х20Р3Т-С	Підшар – 140...160 мкм Основний шар – 200...400 мкм	1	9900	>20	30 % по клею 70 % по межі покриття-основа
			2	14650	>30	60 % по клею 40 % по межі покриття-основа
			3	12200	>25	100 % по клею
			Ср. > 25 МПа			
	Підшар – сплав на нікелевій основі Основний шар – ПП-Нп 80Х20Р3Т-С	Підшар –100 мкм Основний шар – 200...400 мкм	1	11250	>23	100 % по клею
			2	10750	>22	
			3	12300	>25	
			4	12150	>25	
			Ср. > 23,75 МПа			
Механічна обробка з імітацією профілю різьблення глибиною 1,5...2,0 мм	Св. 30ХГСА	1,5...2,0 мм	1	8200	36,4	100 % по межі з осно- вою
			2	6730	29,97	
			Ср. > 33,2 МПа			
	Підшар – алю- мінієва бронза Основний шар – бабіт Б-88	2,2 мм	1	7700	34,2	100 % по межі з осно- вою
			2	10860	48,2	
			3	8430	37,5	
			4	7920	35,1	
	Ср. 38,75 МПа					
Струменево-абразивна обробка (абразивна фракція 0,2...3,0 мм)	Цинк марки Ц0	310 мкм	1	2170	4,5	100% по межі з осно- вою
		270 мкм	2	2300	4,8	
		390 мкм	3	1760	4,4	
		Ср. 4,57 МПа				
	ПП-Нп 80Х20Р3Т-С	400 мкм	1	6250	15,7	100 % по клею
		520 мкм	2	7300	21,3	
		500 мкм	3	6700	19,5	
		Ср. 18,8 МПа				
Лудіння самофлюсую- чою пастою WURTH	Підшар – алю- мінієва бронза	1,66 мм	1	5600	25,4	Відрив бабіту від підшару
		2,0 мм	2	6800	>31	100 % по клею
	Основний шар – бабіт Б-88	1,8 мм	3	7450	34	Відрив бабіту від підшару
		Ср. 30,1 МПа				

Випробування на адгезійну міцність проводили на чотирьох групах циліндричних зразків. Підсумкова таблиця результатів випробувань на адгезійну міцність представлена нижче.

Висновки за таблицею:

1. Випробування на розрив підтвердили досить високу і стабільну адгезійну міцність покриття в межах 23... 25 МПа (середнє значення) при підшарі з бронзи і сплаву на Ni основі.

2. Збільшення адгезійної міцності покриття до 30...48 МПа зумовило наявність рваного різьблення (кругове, поздовжнє) на виробі.

3. Високу міцність показало з'єднання:

– сталь – лудильна паста Wurth–бронза–бабіт – 30,1 МПа (середнє значення);

– 80X20P3T-C (нержавіючий шар із низьковуглецевою сталлю) – 18,8 МПа (середнє значення);



Рис. 9. Зразок-імітатор вісі колісної пари

– Zn-покриття зі сталевою основою має середнє значення 4,57 МПа.

Результати проведених досліджень були успішно апробовані при вирішенні конкретних виробничих завдань. Зокрема, під час ремонту локальних дефектів антифрикційного шару підшипників ковзання енергетичного обладнання на ММК ім. Ілліча (див. рис. 4).

Також НТЦ «Промавтосварка» тісно співпрацює з НДКТИ АТ «Укрзалізниця» у напрямку відновлення широкого застосування електродугової металізації у вирішенні питань відновлення зношених поверхонь деталей рухомого складу та вісей колісних пар, зокрема (рис. 9). При цьому були виготовлені зразки з напиленням сталевими дротиками різного хімічного складу з твердістю напиленого шару в діапазоні HRC 21...44.

Широке застосування способу ЕДМ у різних галузях промисловості обумовлене такими перевагами:

напиленням можна наносити різні покриття на вироби із найрізноманітніших матеріалів. Обладнання для ЕДМ досить мобільне та порівняно просте в експлуатації та обслуговуванні;

ЕДМ є найбільш зручним та високоекономічним методом, рівномірне покриття можна напилювати як на велику площу, так і на обмежені ділянки виробів;

ЕДМ є найбільш ефективним способом відновлення та ремонту зношених деталей із збереженням початкової форми деталі та фізико-механічних характеристик основного металу. Цей метод дозволяє наносити шари завтовшки від кількох десятків мікронів до кількох міліметрів;

для напилення можна використовувати різні метали та сплави, а також різноманітні їх поєднання. Можна напилювати різні матеріали в кілька шарів, що дозволяє отримувати покриття зі спеціальними характеристиками;

технологічний процес ЕДМ забезпечує високу продуктивність нанесення покриття, характеризується відносно невеликою трудомісткістю та можливістю повної або часткової автоматизації процесу.

С.В. Крилов,
директор НТЦ «Промавтосварка»

ПЕРЕДПЛАТА 2022

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	240	720	1440	2880
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	240	480	960
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	240	480	960
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	520	1560	3120	6240

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделоллю.

** 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 електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» 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 або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

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

На сайті видавництва у 2022 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2020 рр.

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: 38044 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>

Календар лютого*

01 лютого 1941 року

В США почалося виробництво танку «Шерман». Порівняно з клепаєм танком М-3 він мав гармату більшого калібру (75 мм), литу чи зварену вежу. У виконанні програми з випуску суцільнозварних танків брала участь фірма «Пульман Стандарт», яка розробила технологію зварювання корпусу та вежі. Була організована конвеєрна лінія збирання та зварювання корпусів. Багатошарове ручне дугове зварювання виконували в нижньому положенні, для чого конструкції розміщували у позиціонерах. Тільки для виготовлення наймасовішої деталі — танкових коліс із низьковуглецевої сталі — застосовували автоматичне зварювання під флюсом на обладнанні, розробленому ще в 1940 р.



02 лютого 1970 року

Заснований ISIM – Національний науково-дослідний інститут зварювання та випробування матеріалів у Румунії, місто Тімішоара, який займається дослідженнями у галузі зварювання та випробування матеріалів. Інститут розробляє процеси моделювання характеристик зварних з'єднань, створює неруйнівні методи контролю, системи контролю та автоматичного керування зварювальним процесом.



03 лютого 1938 року

Народився В.Г. Фартушний (1938–2019) – президент Товариства зварників України, спеціаліст у галузі зварювання високолегованих корозійностійких сталей. У період 1980–2004 рр. директор Всесоюзного проектно-конструкторського інституту зварювального виробництва.



04 лютого 1952 року

Б.Є. Патон та Б.І. Медоваром на початку 1952 р. в Інституті електрозварювання вперше розроблено процес електрошлакового переплаву (ЕШП) для отримання металів високої якості. При ЕШП зміною складу шлаку та температурного режиму процесу здійснюється рафінування металу.



05 лютого 1920 року

Спущений на воду перший у світі корабель із суцільнозварним корпусом «Fullagar». У його конструкції не було використано жодної клепки, оскільки корпус був повністю звареним. Крім того, методом зварювання були виконані паливний, мастильний та водяний баки. У порівнянні з клепаєм, зварний корпус продемонстрував більшу стійкість конструкції, яку, до того ж, легко ремонтувати після пошкодження. Наприклад, великі вм'ятини можна було виправити гідравлічним пресом, тоді як на клепаному корпусі довелося б міняти пошкоджені панелі обшивки.

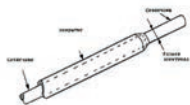


06 лютого 1989 року

Проведено експеримент на установці «Янтар» з нанесення тонкоплівкових покриттів методом термічного електронно-променевого випаровування та конденсації з метою дослідження особливостей та динаміки процесу в умовах космосу. За допомогою цієї апаратури можна було отримувати дослідні партії металевих форм з низькою субмікропористістю, наносити покриття на полімерну підкладку, що рухається, отримувати багатошарові конденсати, проводити фундаментальні дослідження в галузі випаровування багатокомпонентних систем в умовах невагомості та космічного вакууму.



* Матеріал підготовлено компанією ТОВ «СТІЛ ВОРК» (м. Кривий Ріг) за участю редакції журналу.



07 лютого 1935 року

Французький винахідник Р. Саразен запропонував спосіб та машину для безперервного нанесення покриття електродів. Відповідно до його задуму, дріт змотувався при обертанні колеса. Потім він проходив правку в роликах і потрапляв до екструзійного пресу, після чого його розрізали на окремі електроди і транспортером подавали на сушку.



08 лютого 1988 року

Заснований концерн ABB (Asea Brown Boveri Ltd.) – шведсько-швейцарська компанія, що спеціалізується в галузі електротехніки, енергетичного машинобудування та інформаційних технологій. Фірма ABB активно займається виробництвом промислових роботів, у тому числі для зварювальних робіт. Офіси концерну представлені у понад 100 країнах світу. Виробничі потужності розміщуються на території Німеччини, Швейцарії, Швеції, Італії, Франції, Чехії, Індії, Китаю, США, Португалії, Бразилії, Фінляндії, Естонії та ін.



09 лютого 1915 року

Народився Г.П. Сахацький (1915-1992) – відомий вчений і фахівець у галузі холодного зварювання кольорових металів та сплавів. У своїх роботах він відобразив основні принципи контактного стикового зварювання опором та особливості формування сполук таких матеріалів, як високовуглецеві та леговані сталі, мідь, алюмінієві сплави різних систем легування.



10 лютого 2005 року

Спущений на воду «Морський винищувач» (FSF-1) – експериментальне судно морського флоту США. Його корпус має зменшену площу зіткнення з водою, що забезпечує високу стійкість навіть у неспокійному морі. Судно було одним із перших, при виробництві якого почали застосовувати зварювання тертям з перемішуванням при складанні металевих панелей.



11 лютого 1965 року

Вчені Інституту електрозварювання – А.Є. Аснїс та І.М. Савич – вперше розробили обладнання, порошковий дріт та технологію дугового механізованого зварювання мокрим способом під водою. Технологія знайшла широке застосування під час ремонту підводних трубопроводів, конструкцій і навіть судів на плаву.



12 лютого 1981 року

Президент АН УРСР, директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік Б.Є. Патон за видатні роботи в галузі металургії та технології металів був нагороджений Золотою медаллю ім. М.В. Ломоносова – найвищою нагородою АН СРСР.



13 лютого 1951 року

На початку 1951 р. Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона спільно з Новокраматорським машинобудівним заводом розроблено техніку та технологію вертикального електрошлакового зварювання металу товщиною до 2000 мм. Вперше у світі новий спосіб застосований при зварюванні статора гідротурбіни для Мінгечаурської ГЕС.



14 лютого 1930 року

Спущений на воду корабель M/S Carolinian – перший у світі суцільнозварний корабель, призначений для морських перевезень вантажів. Конструкція корабля складалася зі сталевих пластин, зварюваних разом дев'ятьма робітниками. Ця конструкція заощадила чверть вартості та 85 000 фунтів заклепок. Для порівняння, для зварювання знадобилося лише 8000 фунтів зварювального дроту.

15 лютого 1923 року

Засновано Інститут інженерів-зварювальників у Великій Британії, який став попередником Британського Інституту зварювання. Поле діяльності Інституту включало дослідження у галузі зварювання і консультування промислових компаній. На сучасному етапі Інститут зварювання налічує понад 6000 співробітників та є розробником передових технологій у галузі зварювання.

**16 лютого 1912 року**

Запатентовано (патент US1066468A) конденсаторне зварювання та пристрій для його реалізації. Співробітник фірми «Вестінгауз Електрик» Л.В. Чабб, експериментуючи з електричними конденсаторами, виявив, що дріт приварюється до алюмінієвої пластини при проходженні через них накопиченого електричного розряду. Це спостереження дозволило зробити певні висновки: розряд руйнував міцну оксидну плівку, що ускладнювала пайку, і тому з'являлася можливість отримувати міцну сполуку алюмінієвих проводів. Конденсаторне зварювання відразу ж почали застосовувати в електротехніці (приварювання срібних, вольфрамових та інших контактів).

**17 лютого 1982 року**

Помер Р.І. Лашкевич (1899–1982) – талановитий конструктор зварювального обладнання. Ним розроблено ряд оригінальних зварювальних апаратів, установок, механізмів та пристроїв, таких як: вальцезварювальний верстат для шахтних вагонеток, перші зразки апаратів для електрошлакового зварювання, перший в СРСР прохідний стан для автоматичного зварювання труб великого діаметра, головки для електроконтактного зварювання магістральних трубопроводів та інше унікальне зварювальне обладнання.

**18 лютого 1914 року**

Народився В.В. Подгаєцький (1914–1991) – відомий вчений, заслужений діяч науки та техніки України. Він зробив фундаментальний внесок у металургію зварювання, зокрема, у вивчення взаємодії металу, шлаку та газів, причин утворення пір, тріщин та інших дефектів у металі швів.

**19 лютого 1948 року**

За визначні заслуги в галузі науки присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки РРФСР» В.П. Нікітіну – відомому вченому в галузі електротехніки, зварювання та електромеханіки. Основні роботи В.П. Нікітіна присвячені вивченню фізичних процесів в електричній дузі, розробці електромашин і апаратів для дугового зварювання. Він створив конструкцію однокорпусного трансформатора-регулятора для дугового зварювання, який отримав застосування у промисловості. У 1926–1929 рр., будучи професором Катеринославського гірничого інституту, В.П. Нікітін одночасно був консультантом на багатьох підприємствах України та Росії.

**20 лютого 1912 року**

Народився Джордж Девол – американський інженер, розробник першого у світі програмованого робота-маніпулятора Unimate. Робот мав цифрове програмоване управління, яке справило революцію в техніці, вплинувши на хід безлічі виробничих процесів. Крім цього, винахідник зареєстрував ще близько 40 патентів у галузі робототехніки. За свої заслуги та винаходи Дж. Девол був включений до списку найвеличніших винахідників другої половини XX століття.

**21 лютого 1920 року**

Було створено Державну комісію з електрифікації Росії (план ГОЕЛПРО). Пізніше у плані ГОЕЛПРО з'явилася назва майбутньої споруди – Дніпровська гідроелектрична станція. 15 березня 1927 р. на скелі «Любов» було встановлено червоний прапор із написом «Дніпробуд розпочато». Широке поширення при будівництві набули автогенне різання та зварювання, електрозварювання, апарати для стикування арматури та інші механізми.





22 лютого 1937 року

Народився В.М. Сагалеви́ч (1937–1995) – професор МДТУ ім. Н.Е. Баумана, вчений у галузі зварювання, зварювальних деформацій та напруг. Праці професора В.М. Сагалеви́ча присвячені проблемам міцності, теорії зварювальних деформацій та напруг, у тому числі деформаціям тонколистових та тонкостінних конструкцій при зварюванні.



23 лютого 1934 року

Французькі винахідники Роберт Саразен та Марсель Моне́йрон отримали патент FR793302A на розроблене ними електродне покриття, до складу якого входили з'єднання лужних та лужноземельних металів (польовий шпат, мармур, крейда та сода). Завдяки низькому потенціалу іонізації таких елементів, як натрій, калій, кальцій, забезпечувалося легке збудження дуги та підтримка її горіння.



24 лютого 1942 року

Американською авіабудівною компанією Northrop Grumman Corp отримано патент US2274631A на зварювальний пальник Heliarc, призначений для зварювання електродом, що не плавиться (TIG). Створювався цей техпроцес спеціально для виробництва літаків з магнію, з метою економії алюмінію, якого було потрібно все більше в умовах війни.



25 лютого 1936 року

Народився О.К. Назаренко (1936–2014) – відомий вчений у галузі електронно-променевого зварювання, член-кореспондент НАН України. Він створив досконалі джерела живлення, розробив принципи автоматичного спрямування електронного променя вздовж зварного стику та створив відповідні системи, що використовують вторинно-електронну емісію із зони зварювання як джерело інформації. За його участю у промисловість України впроваджено технологію та обладнання для електронно-променевого зварювання ракетних та газотурбінних двигунів.



26 лютого 1934 року

Відкрито перший завод із випуску «народного» автомобіля «Фольксваген». Першим авто, що випускається, став відомий автомобіль VW «Жук». Це наймасовіший автомобіль в історії, який робився без перегляду базової конструкції. Всього було виготовлено 21529464 автомобілів. Розробкою займався Фердинанд Порше (засновник автомобільної компанії Porsche – виробника німецьких спортивних автомобілів), який підтримував зв'язок із Фордом та іншими новаторами, активно впроваджував нові технології на заводі. Зварювання забезпечувало надійність та швидке складання автомобіля на конвеєрі.



27 лютого 1917 року

Джон Кромвель Лінкольн публікує один із своїх патентів у галузі зварювання, а саме на тримач для електроду. Він є засновником компанії «Lincoln Electric», яка перетворилася на американську транснаціональну компанію, що випускає обладнання для дугового зварювання, роботизованого зварювання, плазмового та газового різання. Свій перший зварювальний апарат компанія виготовляє у 1909 р. У 1911 р. Lincoln Electric випускає перший у світі портативний зварювальний апарат з регульованою напругою.



28 лютого 1962 року

Наприкінці лютого на загальних зборах АН УРСР обрано новий склад Президії. Президентом став академік АН УРСР Борис Євгенович Патон, який пропрацював на цій посаді до 2020 р. Сьогодні НАН України включає 174 інститути. Чисельність працівників становить понад 30 тис.