

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ 3 2023

Автоматическая сварка

Automatic Welding

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

Журналу «Автоматичне зварювання» 75 років!..... 3

МЕТАЛОЗНАВСТВО

Головко В.В., Штофель О.О., Короленко Д.Ю. Вплив характеру розподілу неметалевих включень на механічні властивості металу швів низькоалюєваних сталей..... 5

ЗВАРЮВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Шваб С.Л., Селін Р.В., Руханський С.Б. Розробка метало-порошкового дроту на основі титанового сплаву Т120..... 10

ЗВАРЮВАННЯ В ТВЕРДІЙ ФАЗІ

Горбань В.Ф., Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В., Мельниченко Т.В., Крапівка М.О., Вербило Д.Г., Назаренко В.А. Вплив високоентропійного прошарку системи CrMnFeCoNi на мікромеханічні властивості з'єднань з жароміцного сплаву EI437B..... 15

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Калюжний С.М., Савицький В.В., Войнарович С.Г., Кислиця О.М., Файзраманов З.Г. Експериментальне визначення швидкості руху цирконієвих частинок при мікроплазмовому напиленні..... 20

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ

Макаренко А.А., Махненко О.В. Математичне моделювання залишкових напружень в композитному зварному з'єднанні перехідної втулки колектора до патрубку парогенератора ПГВ-440..... 27

ОХОРОНА ПРАЦІ

Левченко О.Г., Полукаров Ю.О., Гончарова О.М., Безушко О.М. Гігієнічні характеристики та закономірності створення магнітних полів при різних способах контактного зварювання..... 39

ІНФОРМАЦІЯ

Перспективи застосування зварювання в космосі..... 46

Пам'яті К.А. Ющенка..... 61

Нова книга..... 62

Компанія Fronius представляє дві нові потужні системи відведення диму та ергономічний пальник із димовідведенням..... 63

CONTENT

The journal «Automatic welding» is 75 years old! 3

METAL SCIENCE

Holovko V.V., Shtofel O.O., Korolenko D.Yu. Influence of the nature of distribution of non-metallic inclusions on the mechanical properties of weld metal of low-alloy steels..... 5

WELDING MATERIALS

Shwab S.L., Selin R.V., Rukhanskyi S.B. Development of metal-cored wire based on T120 titanium alloy..... 10

WELDING IN THE SOLID PHASE

Gorban V.F., Falchenko Iu.V., Petrushinets L.V., Melnichenko T.V., Krapivka M.O., Verbilko D.G., Nazarenko V.A. Influence of high-entropy interlayer of CrMnFeCoNi system on micromechanical properties of joints of high-temperature alloy EI437B..... 15

PROTECTIVE COATINGS

Kalyuzhny S.M., Savytsky V.V., Vojnarovych S.G., Kyslytsya O.M., Fayzramanov Z.G. Experimental determination of velocity of zirconium particles in microplasma spraying..... 20

PROCESS MODELING

Makarenko A.A., Makhnenko O.V. Mathematical modeling of residual stresses in a composite welded joint of the collector adapter sleeve to the branch pipe of ZPM-440 steam generator... 27

OCCUPATIONAL HEALTH

Levchenko O.G., Polukarov Yu.O., Goncharova O.M., Bezushko O.M. Hygienic characteristics and regularities of generating magnetic fields in different methods of resistance welding..... 39

INFORMATION

Prospects for the application of welding in Space..... 46

In memory of K.A. Yushchenko..... 61

New book..... 62

Fronius presents two new powerful smoke extraction systems and an ergonomic burner with smoke extraction..... 63



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



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

Автоматичне зварювання 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, В.В. Кныш,
В.М. Коржик, Ю.М. Ланкін,
Л.М. Лобанов, С.Ю. Максимов,
М.О. Пашчин, В.Д. Позняков,
І.О. Рябцев;**
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
Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко, Міжнародна
Асоціація «Зварювання», Київ

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./факс: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 131, 132, 151
Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію КВ 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2023

Передплатний індекс 70031.
12 випусків на рік (видається щомісячно).
Друкована версія: 3360 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.
Електронна версія: 3360 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.
Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевідаються англійською мовою в журналі
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU:
I.V. Krivtsun (Editor-in-Chief),
V.M. Lipodaev (Staff Deputy Editor-in-Chief)
**O.M. Berdnikova, V.V. Knysh,
V.M. Korzhyk, Yu.M. Lankin,
L.M. Lobanov, S.Yu. Maksimov,
M.O. Pashchin, V.D. Poznyakov,
I.O. Ryabtsev;**
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
Executive Director – O.T. Zelnichenko,
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

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./fax: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 131, 132, 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 2023

Subscription index 70031.

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

\$384, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$312, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

Subscription is possible for previous issues for any year.

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

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

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

Підписано до друку 29.03.2023.
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7,44
Друк ТОВ «ДІА».
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ

Науково-технічний та виробничий журнал «Автоматичне зварювання» було засновано з ініціативи академіка Є.О. Патона у березні 1948 р. У період 1953–2020 рр. головним редактором журналу був академік Б.Є. Патон, потім — академік С.І. Кучук-Яценко, а в теперішній час — академік І.В. Кривцун. За весь час існування журналу у ньому було опубліковано близько 13000 статей з широкої проблематики в галузі зварювального виробництва, що дозволило залучити значну читацьку аудиторію. Цьому сприяло насамперед те, що в ньому вперше висвітлювалися видатні розробки і потім простежувався їх розвиток. Серед них: автоматичне дугове зварювання під флюсом, зварювання з примусовим формуванням металу шва, електрошлакове зварювання, технологія виготовлення листових конструкцій методом рулонування, дугове зварювання по безкисневому флюсу, багат шарові конструкції, зварювання та зварнолітні конструкції, зварювання у вуглекислому газі дротом малого діаметру, імпульсно-дугове зварювання електродом, що плавиться, багатоелектродне дугове зварювання в загальну ванну, контактне зварювання безперервним оплавленням рейок і труб, електронно-променеве зварювання, парофазні технології, мікроплазмове зварювання, механізоване мокре зварювання під водою, плазмове різання, зварювання та різання вибухом, технологія виготовлення криогенної техніки, зварювання та напilenня в космосі, зварювання композитів та полімерів, плазмове та газотермічне напilenня, зварювання живих тканин, створення гібридних процесів зварювання, розробка адитивних технологій та багато іншого.

За шириною охоплення та глибиною висвітлення опублікованих матеріалів випуски журналу часто називають зварювальною енциклопедією. Він допоміг становленню не одного покоління зварників, для яких був і є дієвим посібником.

Зараз «Автоматичне зварювання», як і багато інших наукових журналів, переживає непрості часи, але водночас продовжує виступати ініціатором кваліфікованого інформування фахівців-зварників про стан і розвиток технологій зварювального виробництва. Під патронатом журналу проведено десятки національних і міжнародних конференцій зі зварювання та споріднених технологій. Процеси зварювання й у третьому тисячолітті залишаються ключовою технологією з'єднання матеріалів і створення нових конструкцій. Вони й надалі удосконалюватимуться шляхом розробки високоефективних автоматизованих енергозберігаючих технологій. І в цьому важлива роль, як і раніше, зберігається за професійним журналом «Автоматичне зварювання» з інформаційного забезпечення фахівців зварювального виробництва.

Видавець журналу дотримується політики відкритого доступу до архівів за всі роки, крім поточного та попереднього, починаючи з 2001 р. Детальну інформацію з історії появи та розвитку журналу «Автоматичне зварювання» наведено за посиланнями:

<https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2018/as201803all.pdf>;

<http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2022/as202205part.pdf>.



ПЕРЕМОЖЦІ КОНКУРСУ НА НАЙКРАЩУ СТАТТЮ В ЖУРНАЛІ «АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ» ЗА 2022 Р.

Відповідно до Положення на найкращу науково-технічну статтю, опубліковану в журналах, що видаються ІЕЗ ім. Є.О. Патона, редколегія журналу «Автоматичне зварювання» обрала одну з вісімдесяти статей, опублікованих в журналі за минулий рік. 30 березня 2023 р. на засіданні Вченої ради ІЕЗ директор інституту академік НАН України І.В. Кривцун вручив Грамоту переможцям конкурсу на найкращу статтю в журналі «Автоматичне зварювання» за 2022 р.:

Ігорю Олександровичу Рябцеву (ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ),
Анатолію Анатолійовичу Бабинцю (ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ),
Івану Павловичу Лентюгову (ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ),
Ірині Леонідівні Богайчук (ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ),
Андрію Івановичу Панфілову (ТОВ «Стіл Ворк», м. Кривий Ріг).

Тема роботи: «Електродугове наплавлення зносостійких сплавів на основі заліза та нікелю на мідь», журнал «Автоматичне зварювання», № 5, 2022, с. 10–15. <https://doi.org/10.37434/as2022.05.02>.



Потім один з авторів статті проф. І.О. Рябцев презентував членам Вченої ради результати досліджень формування зварного з'єднання при електродуговому наплавленні на мідь та навів основні висновки по роботі:

- найперспективнішими при наплавленні на мідь є зносостійкі сплави на основі заліза, нікелю та кобальту;
- найекономічнішим є застосування електродугового та плазмово-порошкового методів наплавлення на мідь;
- експериментально відпрацьовано технології електродугового та плазмово-порошкового наплавлення різними типами матеріалів на мідні пластини та мідні циліндричні зразки діаметром 150 мм; встановлено, що кращим з точки зору зварювально-технологічних властивостей та якісного формування наплавленого металу є спосіб електродугового наплавлення у гелії дротом Inconel Alloy 625;
- для забезпечення сплавлення основного та наплавленого металів при дуговому та плазмово-порошковому наплавленні необхідно застосовувати попередній підігрів мідних зразків до 400 °С;
- металографічними дослідженнями підтверджено, що зразки, що наплавлені електродуговим і плазмово-порошковим способами матеріалами на основі нікелю, характеризуються найкращою якістю отриманого з'єднання, а також зносостійкими властивостями;
- проведено модернізацію установки У-653 для забезпечення наплавлення конічних і торцевих поверхонь тіл обертання складної геометричної форми типу фурм доменних печей;
- вибрано наплавні матеріали та розроблено техніку і технологію електродугового наплавлення мідної рильної частини фурми для доменних печей дротом Inconel Alloy 625 у середовищі гелію, що дозволить підвищити її експлуатаційні властивості.

Редакція журналу

ВПЛИВ ХАРАКТЕРУ РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ШВІВ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

В.В. Головка¹, О.О. Штофель¹, Д.Ю. Короленко²

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

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Проведено комплекс робіт з встановлення характеру розподілу неметалевих включень в структурі металу низьколегованих зварних швів. В результаті виконання металографічних досліджень встановлено показники об'ємного вмісту включень в структурі, розподіл їх за розмірами. Показана доцільність використання такого додаткового показника як щільність розподілу для більш інформативного опису неметалевих включень при оцінюванні їх впливу на механічні властивості металу швів. Запропоновано використання фрактального аналізу для виявлення особливостей щільності розподілу неметалевих включень в металі швів. Бібліогр. 6, рис. 4.

Ключові слова: зварні шви, мікроструктура, неметалеві включення, щільність розподілу, схильність до крихкого руйнування, фрактальний аналіз

Вступ. Неметалеві включення є невід'ємною частиною структури низьколегованих сталей, тому їх впливу на механічні властивості зварних швів традиційно приділяють велику увагу. Вважається, що неметалеві включення в зварювальній ванні утворюються внаслідок перебігу термодинамічних реакцій або поступають при плавленні основного металу та зварювальних матеріалів. В фундаментальних монографіях з цього питання [1, 2] було показано особливості впливу об'ємного вмісту включень, їх хімічного складу та морфології на формування структури та механічні властивості зварних швів. Проведені дослідження показали, що деякі включення певної морфології можуть сприяти утворенню в металі швів низьколегованих сталей мікроструктурних складових підвищеної в'язкості. Виходячи з цих результатів виникла ідея не розраховувати на утворення потрібних неметалевих включень в металі швів, а забезпечувати їх присутність в металі завдяки інокулюванню до зварювальної ванни контрольованої кількості тугоплавких сполук певного розміру та хімічного складу. Останнім часом з'явилися публікації, в яких досліджується особливості впливу на структуру та механічні властивості металу швів неметалевих включень, які були цілеспрямовано інокулювані до зварювальної ванни [3, 4]. У високотемпературному металевому розплаві відбувається розчинення неметалевих включень, тому, з метою гальмування цього процесу стосовно інокулянтів, їх вводять до «холодної» зони зварювальної ванни. Відповідно змінюються умови розподілу неметалевих включень в металі швів.

Проведені нами дослідження були спрямовані на з'ясування особливостей розподілу неметалевих включень в структурі металу швів низьколегованих сталей, розширенню бази знань щодо впливу певних показників, які описують ці особливості, на механічні властивості металу зварних швів низьколегованих сталей, зокрема, на схильність до крихкого руйнування.

Мета роботи полягала у визначенні можливості врахування щільності розподілу неметалевих включень в металевій матриці при оцінюванні їх впливу на механічні властивості металу зварних швів низьколегованих сталей.

Дослідження виконували стосовно неметалевих включень на базі титану, присутність яких в металі швів забезпечували інокулюванням зварювальної ванни відповідними тугоплавкими сполуками.

Методика проведення досліджень. Дослідження проводили на зразках металу швів, які були виконані за методикою [5] при дуговому зварюванні в середовищі захисного газу (82 % Ar, 18 % CO₂) порошковим дротом діаметром 1,6 мм типу «metal core» на постійному струмі 200 (±5) А, напрузі 30 (±2) В з погонною енергією 21 (±2) кДж/см. Для визначення характеру розподілу неметалевих включень в металі швів до «холодної» частини зварювальної ванни вводили порошок дріт діаметром 1,6 мм, осердя якого містило суміш з 10 % частинок тугоплавких з'єднань розміром 0,040...0,200 мм та 90 % залізного порошку марки ПЖВ за ДСТУ 9849. В якості інокулянтів були обрані з'єднання на основі титану:

оксид титану (шов TiO_2), карбід титану (шов TiC), нітрид титану (шов TiN). Отримані результати порівнювали з даними зразків металу шва, отриманих при зварюванні порошковим дротом, до складу осердя якого вводили феротитан (шов $FeTi$).

Металографічні дослідження проводили на поперечних шліфах, вирізаних із зварних з'єднань. Структуру металу швів досліджували на оптичному мікроскопі, вплив розподілу неметалевих включень на особливості руйнування металу визначали за результатами фактографічних зображень, отриманих на скануючому електронному мікроскопі «JSM-35».

Розподіл включень за розмірами і побудову відповідних графіків виконували безпосередньо зі шліфів. По заданій програмі на приладі виконували підрахунок кількості включень у кожному зразку по розмірних групах – від мінімального розміру до максимального.

Щільність розподілу неметалевих включень в структурі металу швів визначали за методикою, наведеною в роботі [6].

Таблиця 1. Хімічний склад металу швів, мас. %

Номер шва	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti
FeTi	0,050	0,290	1,32	0,024	0,014	0,16	2,19	0,27	0,36	0,039	0,019
TiC	0,054	0,263	1,28	0,025	0,011	0,13	2,22	0,26	0,49	0,035	0,009
TiN	0,035	0,317	1,40	0,019	0,009	0,14	2,29	0,26	0,56	0,036	0,011
TiO_2	0,035	0,405	1,24	0,016	0,021	0,11	1,97	0,27	0,68	0,031	0,017

Таблиця 2. Механічні властивості металу швів

Номер шва	Rm	Re	A	Z	KCV, Дж/см ² при T, °C			
	МПа		%		20	0	-20	-40
FeTi	788	739	11,4	35	60	58	57	52
TiC	716	644	19	63	111	97	85	73
TiN	712	580	5,3	14,7	55	47	40	35
TiO_2	709	636	19	57	85	72	60	50

Механічні властивості металу зварних швів оцінювали за результатами стандартних випробувань відповідно до вимог ДСТУ ISO 6892-1:2019, ДСТУ EN 10045-1:2006, ДСТУ ISO 15792-1:2009.

Результати досліджень. В табл. 1 та 2 наведено результати визначення хімічного складу та механічних властивостей металу досліджених швів.

На рис.1 наведено гістограми розподілу за розмірами та об'ємну частку неметалевих включень в металі швів.

На рис. 2 наведено зразки мікроструктури металу швів, які були отримані методами оптичної металографії.

Метал шва FeTi характеризується дрібнозернистою бейнітно-мартенситною структурою за деякої її фрагментації, формуванням внутрішньо-об'ємних дисперсних фаз, що має забезпечувати високий рівень механічних властивостей. Бейнітна складова представлена переважно бейнітом нижнім (понад 50 %) та верхнім. Також зафіксовано до 10 % мартенситної складової. В об'ємі бей-

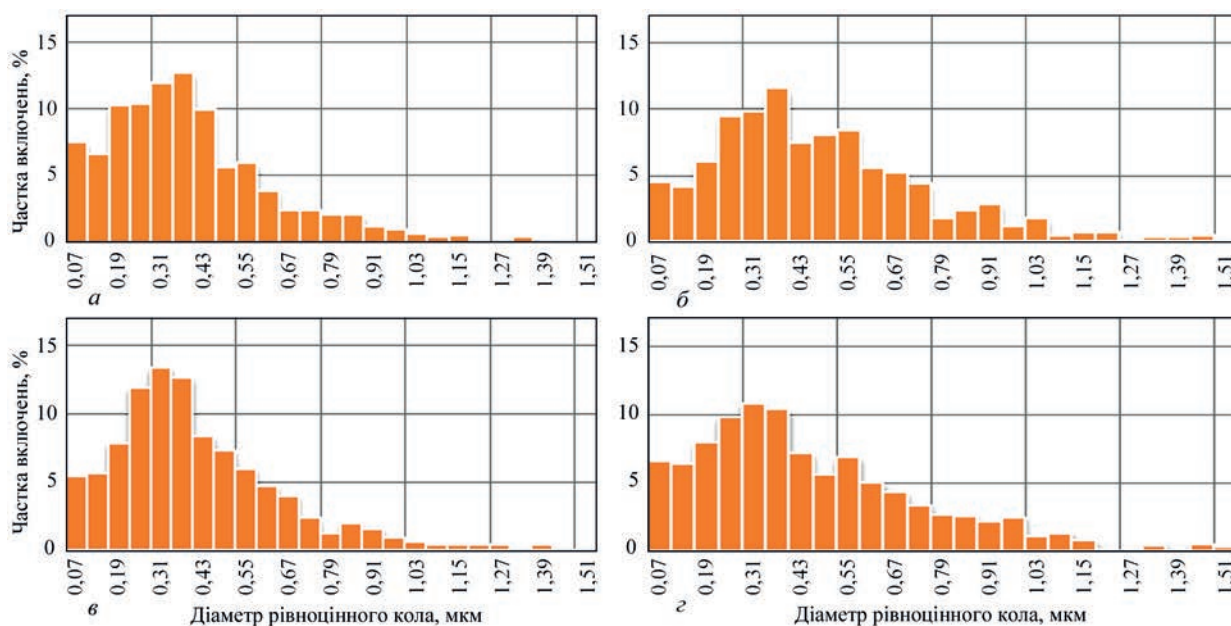


Рис. 1. Гістограми розподілу за розмірами та об'ємна частка (V) неметалевих включень в металі швів: а – FeTi; б – TiC; в – TiN; з – TiO_2 (а, б – V = 0,62 %; в – 0,77; з – 0,47)

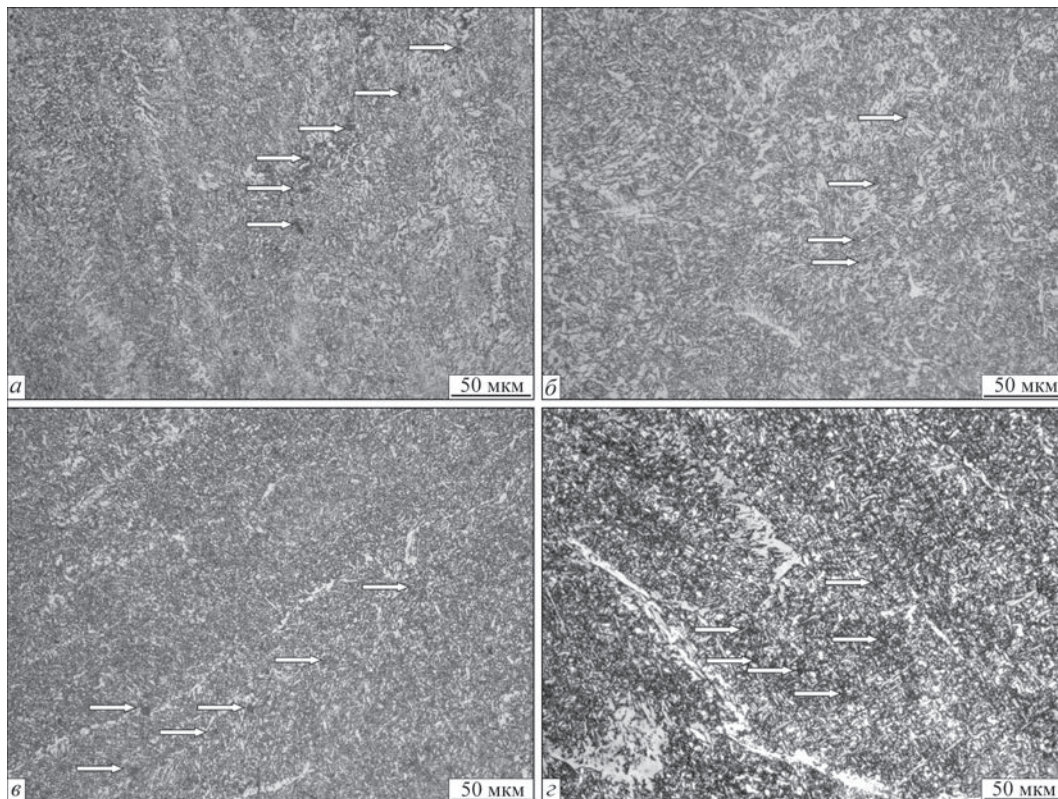


Рис. 2. Зразки мікроструктури металу швів: *a* – FeTi; *б* – TiC; *в* – TiN; *г* – TiO₂ (стрілками позначено типове розташування неметалевих включень)

нітних зерен чітко проглядаються частинки фаз дисперсних розмірів карбідного типу.

У металі швів зразків TiC формується бейнітно-мартенситна структура, яка містить переважно верхній бейніт (близько 60 %), нижній бейніт близько 25 % і мартенсит (до 10 %) при незначній фрагментації структури. В об'ємі зерен бейнітної структури спостерігаються частинки фазових виділень дисперсних розмірів карбідного типу при відносно однорідному їх розподілі. Для внутрішніх мікрооб'ємів структури характерна порівняно невисока щільність розподілу неметалевих включень.

У металі шва TiN формується неоднорідна бейнітно-мартенситна структура, яка містить близько 60 % верхнього бейніту, нижній бейніт (близько 20 %) та мартенсит (до 10 %). В зернах бейнітної структури спостерігаються частинки фазових виділень дисперсних розмірів карбідного типу при відносно однорідному розподілі. По межах феритних зерен спостерігається наявність ланцюжків фазових виділень, які є фазами карбонітридного типу TiCN, що повинно призводити до зниження рівня механічних властивостей і помітному зниженню тріщиностійкості зварного шва.

Метал шва TiO₂ характеризується нерівномірною бейнітно-мартенситною структурою при незначній її фрагментації. Бейнітна складова представлена переважно бейнітом верхнім (понад 50 %) і нижнім (близько 30 %). Вміст мартенситу не перевищує 10 %. У тілі бейнітних зерен струк-

тури проглядаються частинки фаз дисперсних розмірів карбідного типу, а також зустрічаються поодинокі фазові виділення типу оксидів титану більших розмірів.

Аналіз результатів дослідження. Вплив складу, вмісту та морфології неметалевих включень на структуру та механічні властивості низьколегованих сталей взагалі і металу зварних швів зокрема традиційно привертає велику увагу [1–3]. Зниження показників механічних властивостей, яке було отримано на зразках металу шва TiN, цілком відповідає опису впливу нітридів, який наведено в позначених монографіях. Звертає на себе увагу різниця в розподілі неметалевих включень в структурі металу досліджених швів. Металографічний аналіз показав, що певна кількість неметалевих включень в металі швів FeTi та TiN розташовані по границям феритних зерен, в той час як для структури швів TiC та TiO₂ характерним є переважний розподіл включень в тілі феритних зерен. Така особливість розподілу включень ілюстрована на рис. 2, де розташування неметалевих включень позначено стрілками.

Для з'ясування яким чином така особливість розподілу включень впливає на механічні властивості металу швів були проведені фрактографічні дослідження зламів зразків, які отримані при визначенні ударної в'язкості металу швів при температурі –40 °С. Результати досліджень показані на рис. 3.

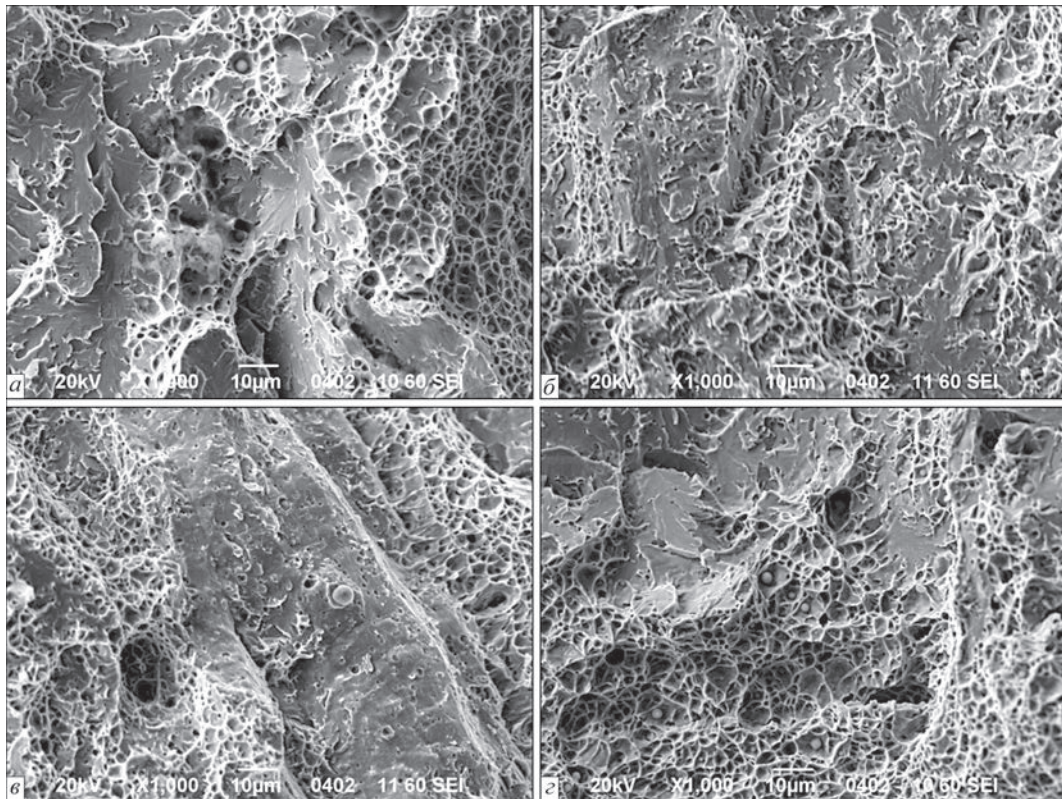


Рис. 3. Фрактографії зламів зразків: *a* – FeTi; *b* – TiC; *c* – TiN; *d* – TiO₂

З наведених даних видно, що дисперсні неметалеві включення, які розташовані на границях феритних зерен, слугують джерелами зародження тріщин типу крихкого сколу, як це видно на рис. 3, *a*, *c*. В тих випадках, коли більшість включень розташована в тілі феритних зерен (рис. 3, *b*, *d*), дисперсні включення не є центрами зародження крихких тріщин.

Визначення характеру розподілу неметалевих включень. Відповідно до сучасних уявлень, вплив неметалевих включень на схильність металу до крихкого руйнування пов'язано з ініційованими навколо них полями напруження. Однофазні включення, коефіцієнт термічного розширення яких нижче ніж у металевої матриці, сприяють формуванню більш високого рівня напружень порівняно з включеннями, що складаються з декількох шарів різних за складом. В тому разі, коли включення розташовані в металевій матриці на відстані одне від одного, яке перевищує радіус дії індукованого включенням напружень, їх вплив на схильність металу до крихкого руйнування менший порівняно з ситуацією, коли включення розташовані значно ближче. Виходячи з цих уявлень, відстань між включеннями є однією з важливих характеристик розподілу неметалевих включень в металі швів.

Методи комп'ютерної обробки оптичних зображень полірованої поверхні шліфів досліджених швів дають можливість отримати цифрову інформацію як до загального вмісту неметале-

вих включень в металі, так і до розподілу їх за розмірами (див. рис. 1). Ці дані дають уявлення про узагальнені характеристики включень, але не дозволяють виявити особливості їх розподілу в структурі металу швів. Інформація щодо загального вмісту неметалевих включень та характером їх розподілу за розміром не дають підстав для виявлення факторів, які зумовлюють різницю показників в'язкості та пластичності металу досліджених швів. Для вирішення цієї проблеми доцільно залучення методів фрактального аналізу неметалевих включень.

В роботі [6] було запропоновано спосіб фрактального аналізу структурних складових металу, який дозволяє визначити особливості щільності (відстані між сусідніми включеннями) розподілу неметалевих включень. Вплив включення на схильність до виникнення сколу в оточуючій металевій матриці залежить від рівня напружень, які виникають на міжфазній границі і від відстані до сусідніх включень. Виходячи з наведених міркувань були виконані роботи з фрактального аналізу зразків металу швів з метою визначення характеру їх розподілу відповідно до відстані до найближчих сусідніх включень. Результати досліджень наведено на рис. 4.

Як видно з наведених даних найвищу щільність розподілу включень мають шви FeTi та TiN. Саме ці шви характеризуються структурою, в якій відзначена підвищена присутність включень на границях феритних зерен (рис. 2) і це супрово-

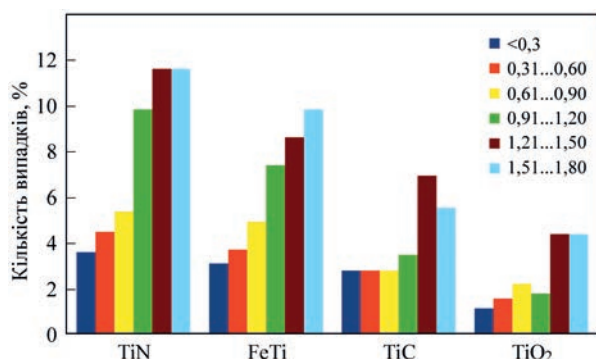


Рис. 4. Результати фрактального аналізу щільності розподілу неметалевих включень в метали швів (наведено відносна кількість випадків відстані між двома сусідніми включеннями (мкм) в означеному розмірному діапазоні відстані (мкм)) джується зниженням показників в'язкості і пластичності (табл. 2). При цьому слід відзначити, що більш висока щільність розподілу включень в металі шва TiN супроводжується і більш низьким рівнем показників в'язкості та пластичності.

В металі швів TiC та TiO₂ кількість випадків з підвищеною щільністю розподілу включень помітно менша, що може слугувати поясненням більш високого рівня відповідних показників.

Отримані результати свідчать, що поєднання таких двох факторів, як присутність неметалевих включень на границях зерен і підвищена щільність їх розподілу призводить до зниження показників в'язкості та пластичності металу зварних швів ВМНЛ сталей.

Висновки

Проведено комплекс робіт з встановлення характеру розподілу неметалевих включень в структурі

металу низьколегованих зварних швів. В результаті виконання металографічних досліджень встановлено показники об'ємного вмісту включень в структурі, розподіл їх за розмірами. Показана доцільність використання такого додаткового показника як щільність розподілу включень при оцінюванні їх впливу на механічні властивості металу швів. Запропоновано використання фрактального аналізу для виявлення особливостей впливу неметалевих включень на механічні показники металу швів ВМНЛ сталей з врахуванням щільності розподілу включень.

Список літератури/References

- Liu, S., Olson, D.L. (1987) The influence of inclusion chemical composition on weld metal microstructure. *Journal of Materials Engineering*, **9**, 237–251.
- Lienert, T.J., Babu, S.S., Siewert, T.A. (2011) *Solid-State Transformations in Weldments*. In the ASM Handbook®. Welding Fundamentals and Processes, V.L. Acoff (ed.), 6A, ASM International®, Materials Park, 133–135.
- Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe, R.W.K. (2006) *Steels: Microstructure and Properties*. 3rd edition: Elsevier Ltd.
- Kang, Y. et al. (2014) Influence of Ti on nonmetallic inclusion formation and acicular ferrite nucleation in high strength low alloy steel weld metals. *Metals and Materials International*, **20**(1), 119–127.
- Holovko, V.V., Yermolenko, D.Yu., Stepanyuk, S.M. et al. (2020) Influence of introduction of refractory particles into welding pool on structure and properties of weld metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 1–7.
- Штофель О., Короленко Д., Головко В. (2023) Комп'ютеризація процесу обрахунку параметрів неметалічних включень в металі. *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. Stockholm, Sweden*, 423–434. DOI: 10.46299/ISG.2023.1.7

Shtofel, O., Korolenko, D., Holovko, V. (2023) Computerization of calculation process of nonmetallic inclusion parameters in metal. In: *Proc. of the VII Int. Sci. and Pract. Conf. Stockholm, Sweden*, 423–434. DOI: 10.46299/ISG.2023.1.7

INFLUENCE OF THE NATURE OF DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELD METAL OF LOW-ALLOY STEELS

V.V. Holovko¹, O.O. Shtofel¹, D.Yu. Korolenko²

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

E-mail: v_golovko@ukr.net

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

A complex of works was carried out on establishing the nature of distribution of non-metallic inclusions in the structure of metal of low-alloy welds. As a result of metallographic examinations, the values of the volume content of inclusions in the structure and their distribution by sizes were established. The rationality of using such an additional indicator as the distribution density for a more informative description of non-metallic inclusions when evaluating their influence on the mechanical properties of weld metal was shown. The use of fractal analysis to reveal the features of the distribution density of non-metallic inclusions in the weld metal was proposed. 6 Ref., 4 Fig.

Keywords: welds, microstructure, non-metallic inclusions, distribution density, tendency to brittle fracture, fractal analysis

Надійшла до редакції 06.03.2023



VII Міжнародна конференція
«Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи
діагностування і прогнозування»

Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя

18–20 жовтня 2023 р.

<https://dmdp.tntu.edu.ua/>

РОЗРОБКА МЕТАЛОПОРОШКОВОГО ДРОТУ НА ОСНОВІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ T120

С.Л. Шваб, Р.В. Селін, С.Б. Руханський

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

Застосування високоміцних титанових сплавів в сучасному авіабудуванні з кожним роком ставить нові виклики як перед розробниками таких сплавів, так і перед спеціалістами в галузі з'єднання матеріалів. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) дуже перспективна технологія, що дозволяє виготовляти великогабаритні деталі складної форми з матеріалів з високою доданою вартістю. Ця технологія є частиною процесів адитивного виробництва, яка використовує металеві дроти в якості присадного матеріалу, а дугу як джерело енергії. У даній роботі показано застосування розробленого дослідного металопорошкового дроту на основі перспективного вітчизняного високоміцного титанового сплаву T120 при багатощаровому наплавленні аргонодуговим способом. Досліджена мікроструктура з'єднання, його мікротвердість та механічні властивості. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: високоміцні титанові сплави, WAAM, TIG, металопорошковий дріт

Вступ. Серед багатьох металевих матеріалів сплави на основі титану все частіше застосовуються при адитивному виробництві деталей завдяки їх використанню в аерокосмічній промисловості для виробництва планерних конструкцій. Високоміцні двофазні титанові сплави користуються великим попитом в авіакосмічній галузі завдяки високій питомій міцності, корозійній стійкості, стійкості до пошкоджень та сумісності з композитними матеріалами з графітового волокна [1]. З різних доступних підходів процес WAAM має ряд переваг перед іншими технологіями, включаючи: високий коефіцієнт використання матеріалу (99 % [2]) та енергоефективність (~70 % [3]), нижчі капітальні витрати на обладнання, високі показники переносу металу в кілограмі на годину [4].

Розвиток сучасних технологій і розробка нових конструкцій з них потребує впровадження нових конструкційних матеріалів. Одним із таких є титан та сплави на його основі. Особлива увага в цьому напрямку приділяється складнолегованим високоміцним титановим сплавам, які все більше знаходять своє застосування при проектуванні конструкцій, які працюють в умовах високих навантажень [5]. Одним з таких прикладів є високоміцний титановий сплав T120 системи Ti–Al–Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr, розроблений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [6]. Даний сплав має високі механічні характеристики: в стані після прокату та наступної термічної обробки показники межі міцності знаходяться на рівні 1186 МПа, відносно подовження становить 13,3 %, а ударна в'язкість становить 13,5 Дж/см².

Метою даної роботи була розробка металопорошкового дроту на основі титанового сплаву T120, для наступного використання в якості присадного дроту при адитивному виробництві (метод WAAM), а саме пошарового наплавлення способом TIG (Tungsten Inert Gas), та дослідження якості утвореного з'єднання.

Виробництво дротів суцільного перерізу на основі високоміцних титанових сплавів вельми складний та затратний процес, а подекуди і неможливий через високі механічні показники відповідних сплавів титану. Задля вирішення цієї проблеми свого часу було розроблено декілька типів порошкових дротів на основі титану, які знайшли своє застосування як при зварюванні титанових сплавів завтовшки 6...15 мм за один прохід [7], так і при відновлювальному наплавленні [8]. Конструкція цих дротів представляє собою оболонку з чистого титану марки VT1-00 та осердя, склад якого формується в залежності від типу та подальшого призначення дроту. Одним із таких прикладів є дріт марки ППТ-22, який був розроблений як для багатопрохідного зварювання високоміцного титанового сплаву VT22, так і для відновлювального наплавлення деталей із цього сплаву [9].

В якості осердя дроту ППТ-22 використовуються гранули з титанового сплаву VT22, попередньо отримані способом плазмового розпилення заготовки. Варто зазначити, що матеріал у цьому випадку можна отримати високої якості, а вміст атмосферних газів у металі не перевищує допустимих значень. Недоліком такого матеріалу при використанні в якості осердя є сферична форма гранул – під час зварювання вони не щільно утри-

Шваб С.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-4627-9786>, serg.schwab@gmail.com,

Селін Р.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2990-1131>, selinrv@gmail.com

Руханський С.Б. – <https://orcid.org/0009-0002-1260-3688>, rukhansky@gmail.com

© С.Л. Шваб, Р.В. Селін, С.Б. Руханський, 2023

муються в сформованій трубі і під тиском зварювальної дуги розлітаються. Для уникнення таких проблем необхідно проводити попередні роботи зі зміни форми частинок, що є досить тривалим процесом.

Матеріали, обладнання та методики. З вище зазначених причин представляє інтерес використання металеві складові осердя металопорошкових дротів, отриманої іншим способом. Одним із таких прикладів є спосіб HDH (hydrogenation/dehydrogenation) – гідрування та наступне дегідрування металу [10]. Цим способом було отримано порошок зі сплаву Т120 двох фракцій (таблиця). У меншій фракції з розміром частинок порошку в 50 мкм вміст кисню перевищує допустимі значення більш ніж втричі, при цьому кількість водню та азоту знаходиться в допустимих межах (для високоміцних сплавів згідно ГОСТ 19807-91 вміст кисню не може перевищувати 0,2 мас. %, водню – 0,015, азоту – 0,05). У фракції з розміром частинок 200...315 мкм вміст кисню перевищує допустимі значення всього на 0,02 мас. %, тому подальша робота проводилась з порошком даної фракції.

Розробка та виробництво металопорошкового дроту на основі титанового сплаву Т120 відбувалося методом волочіння та наступних перетяжок на установці, яка призначена для виробництва титанових порошкових дротів (рис. 1). В якості обо-

Таблиця. Результати газового аналізу порошку титанового сплаву Т120, отриманого способом HDH (мас. %)

Розмір частинок, мкм	[O]	[N]	[H]
50...75	0,66	0,04	0,0143
200...315	0,22	0,03	0,0104

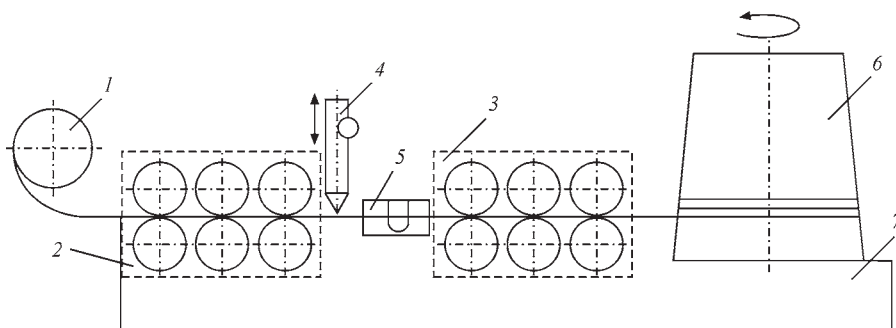


Рис. 1. Схема волочильного верстата для виробництва порошкового титанового дроту: 1 – касета; 2, 3 – роликів кліт; 4 – дозатор; 5 – U-подібна планка; 6 – барабан; 7 – станина



Рис. 2. Загальний вигляд наплавленого з'єднання (а) та його макрошліф (б)

лонки застосовувалась титанова фольга марки ВТ1-00, завтовшки 0,2 мм. Встановлено, що оптимальною лінійною швидкістю при перетягуванні після формування є швидкість 0,4 м/хв, при якій забезпечується оптимальне висипання шихти у сформований жолоб, а також виключається викривлення вихідної трубки. Перетяжка здійснюється за допомогою набору філь'єр з кроком 0,1 мм. Дріт подається у філь'єру таким чином, щоб на барабані він розміщувався швом назовні, оскільки розтягнення зовнішніх волокон призводить до додаткового закриття шва, а також виключає викривлення (гофр). У результаті експериментів було отримано якісний дріт діаметром 2,2 мм з коефіцієнтом заповнення 50 %.

Отриманий дріт був використаний в якості присадки при багат шаровому наплавленні на пластину зі титанового сплаву Т120. Процес наплавлення відбувався аргонодуговим способом неплавким електродом на наступному режимі: $I_{зв} = 160..180$ А, $U_d = 12$ В, $V_{зв} = 6$ м/год, $V_{под} = 40..45$ м/год, $L_d = 2$ мм.

Дослідження якості отриманих з'єднань. У результаті проведених робіт було отримано п'ятишарове наплавлене з'єднання (рис. 2).

Була досліджена мікроструктура наплавленого з'єднання. Вихідна структура основного металу (рис. 3, а) складається переважно з рівновісних зерен β -фази різних розмірів, що вказує на деформований стан основи. Деформація відбувалась в β -області, після чого метал охолоджувався на повітрі. Ближче до початку зони термічного впливу (ЗТВ) спостерігається специфічна структура зі слабо вираженими поодинокими зонами існування пластин α -фази, що може відповідати зоні часткової струк-

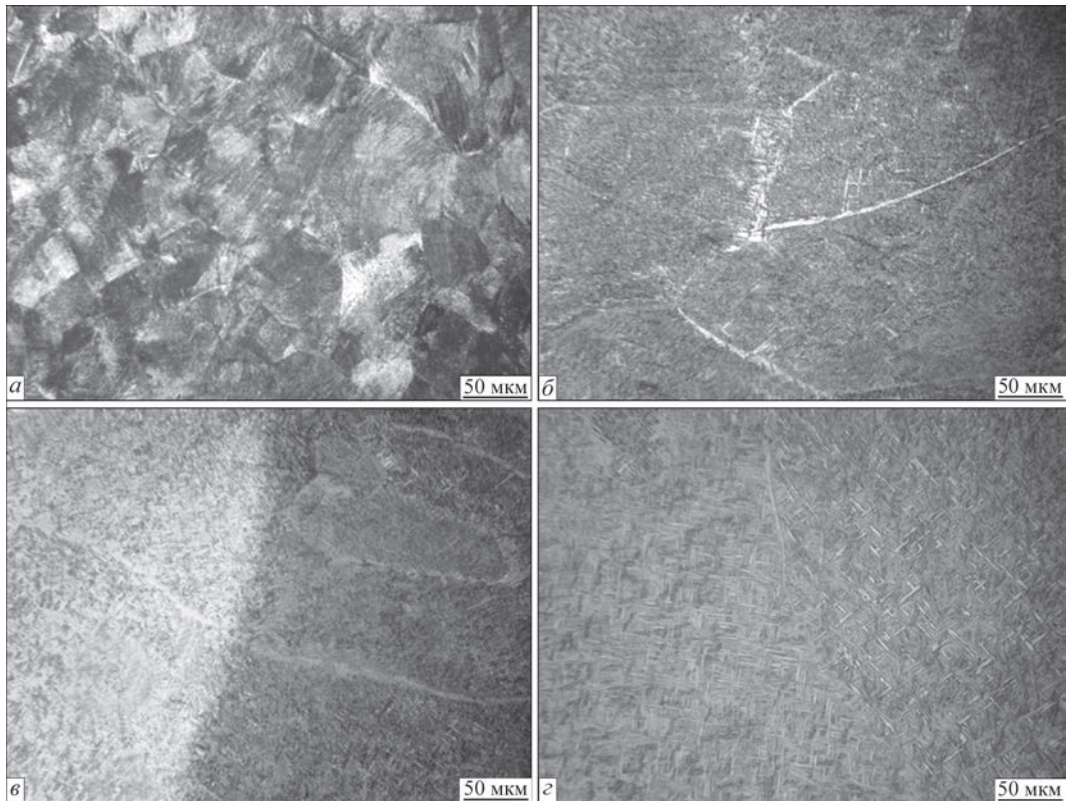


Рис. 3. Мікроструктура наплавленого з'єднання: *a* – основний метал; *b* – зона термічного впливу; *v* – зона сплавлення; *z* – наплавлений метал

турної трансформації, яка знаходиться перед зоною рекристалізації. На це вказує одночасна присутність структури, схожої на метал-основу і більш дрібнозерниста β -фаза. У ЗТВ (рис. 3, *b*) біля основного металу і більшою мірою в центральній частині можна виділити зону рекристалізації, що виражається в подрібненні вихідної деформованої структури та проходженню фазової перекристалізації, в результаті чого відбувається доволі рівномірне виділення дисперсної α -фази всередині. В області сплавлення (рис. 3, *v*) спостерігається зона плавного градієнтного переходу. Збільшення кількості α -фази відбувається поступово від металу основи до наплавленого металу, який має менший вміст легуючих, в основному β -стабілізуючих, елементів. Найявна незначна пористість газоусадкового походження та формування α -фази на межах первинних зерен. Ці дві ознаки є факторами зниження міцності, але структурну складову можна виправити термічною обробкою. Структура крайової зони сплавлення формується схожим чином, проте за рахунок більш тривалого охолодження спостерігається виділення α -фази на межах первинних β -зерен, що може призвести до зниження ударної в'язкості. Область з'єднання основного металу та наплавленого металу в зоні формування кута змочування має більш грубу будову межі сполучення та ярко виражені ознаки насичення поверхневих об'ємів газами.

Оскільки присадний металопорошковий дріт має оболонку з чистого титану і є менш легова-

ним у порівнянні з металом-осною, в наплавленому металі (рис. 3, *z*) можна спостерігати більшу кількість α -фази та її більш крупні розміри. Зона наплавленого металу характеризується крупнозернистою структурою, подібною до структури направленої кристалізації. В наплавленому металі часто зустрічаються пори усадкового походження, на що вказує відсутність навколо них більш вираженого газонасиченого ореолу α -фази. При цьому, структура основного металу та наплавленого металу залишаються досить схожими, що вказує на їх повноцінне перемішування та дифузії елементів. Такий характер структури є позитивним з точки зору гомогенності з'єднання. В середній області наплавленого шару спостерігається схожа та доволі рівномірна структура, в якій за рахунок доволі повільного охолодження відбувається зростання пластин α -фази в кілька разів, порівняно з ділянками, які знаходяться ближче до лінії сплавлення. У верхніх шарах наплавленого з'єднання на межах первинних β -зерен формуються області дисперсних щільних α -пластин і мікропор, що може вказувати на незначно збільшений уміст газів у даних областях. Схожу структуру мають бокові зони наплавленого металу, але в них спостерігається більше забруднення газами, що виражається в більшій кількості пор та більшій неоднорідності будови α -зерен та їх колоній.

Дослідження мікротвердості (рис. 4) показало підвищення показників основного металу в на-

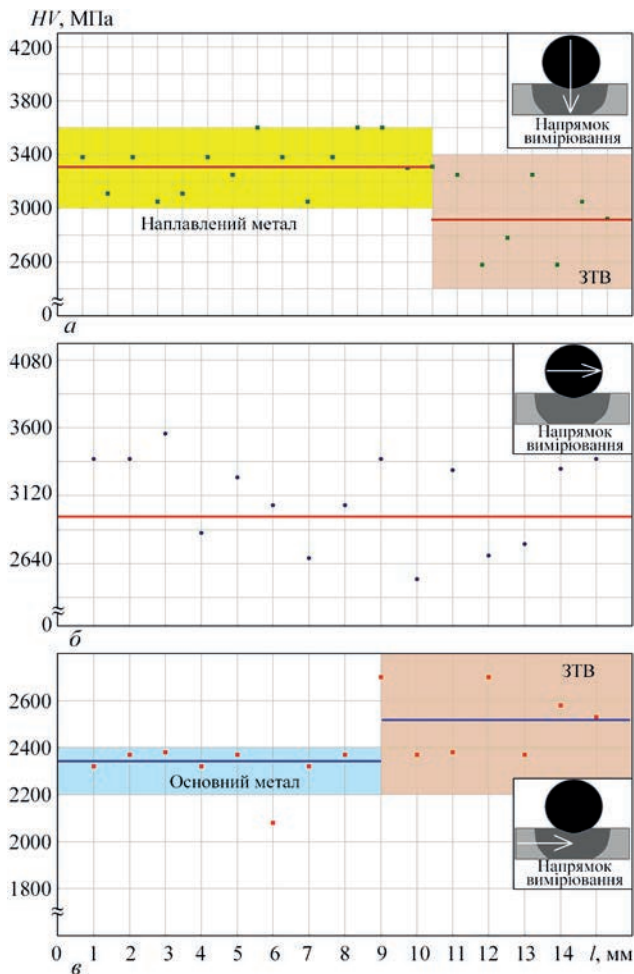


Рис. 4. Мікротвердість наплавленого з'єднання: *а* – в повздовжньому напрямку (наплавлений метал та ЗТВ); *б* – в поперечному напрямку наплавленого шару; *в* – в повздовжньому напрямку (основний метал та ЗТВ)

прямку від краю до зони термічного впливу, що пояснюється збільшенням кількості α -фази та її стабілізації. Як відомо, ГЦУ (гексагональна щільноупакована) кристалічна ґратка має вищу твердість, ніж ОЦК (об'ємноцентрована кубічна), до того ж, в найбільш наближеній до наплавленого металу зоні ймовірно могло відбуватися незначне насичення металу газовими домішками. Підвищення мікротвердості від ЗТВ металу-основи до наплавленого металу не відбувається і спостерігається тільки в зоні розплавлення, що можна пояснити також збільшенням вмісту газів у металі. Подальше підвищення мікротвердості в наплавленому металі відбувається поступово, що пов'язано більшою мірою з особливостями формування структурно-фазового стану, відмінного від основного металу. Високі показники мікротвердості в найвищому об'ємі наплавки (8 мм зверху) може пояснюватись підвищеним вмістом кисню в металі шихти, а також швидким охолодженням наплавленого металу, що призводить до формування більш твердих фаз мартенситного типу α' .

Межа міцності наплавленого металу становить 878,7 МПа, ударна в'язкість – 15,1 Дж/см², що значно нижче значень механічних характеристик основного металу: $\sigma_b = 1145,8$ МПа, $KCV = 30,6$ Дж/см². Це пояснюється наявністю пористості в наплавленому металі. Задля попередження зародження пор в наплавленому металі необхідно вводити флюсову складову в метал осердя. Також високоміцні двофазні титанові сплави та отримані з ними з'єднання піддаються обов'язковій термічній обробці, що в свою чергу дозволяє підвищити рівень механічних характеристик.

Висновки

1. Було розроблено дослідний присадний металопорошковий дріт на основі титанового сплаву Т120. В якості осердя дроту використовувався порошок сплаву Т120, отриманий способом HDH.

2. Отриманий дріт було використано в якості присадки при багатощаровому аргонодуговому наплавленні. Наплавлений метал має досить однорідну мікроструктуру, при цьому часто зустрічаються мікропори, що є наслідком підвищеного вмісту газів в порошок. Як результат – невисокі показники механічних характеристик наплавленого металу в порівнянні з основним металом.

3. Для запобігання утворенню таких дефектів необхідно вводити флюсову складову в осердя металопорошкового дроту. Для підвищення механічних характеристик наплавленого з'єднання зі сплавом Т120, як і для подібних йому високоміцних сплавів ВТ22, ВТ23 та Т110, необхідно проводити термічну обробку.

Список літератури/References

1. Martina, F., Colegrove, P. A., Williams, S. W. et al. (2015) Microstructure of interpass rolled wire arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(12), 6103–6118.
2. Ríos, S., Colegrove, P. A., Martina, F. et al. (2018) Analytical process model for wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, 651–657.
3. Bekker, A.C., Verlinden, J.C. (2018) Life cycle assessment of wire arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. *Journal of Cleaner Production*, 177, 438–447.
4. Lütjering, G., Williams, J.C. (2007) *Titanium. Fundamental aspects. 2nd Edition*, Springer, Berlin Heidelberg.
5. Williams, J.C., Boyer, R.R. (2020) Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components. *Metals*, 10(6), 705.
6. Ахонин С.В., Селин Р.В., Березос В.А. и др. (2016) Разработка нового высокопрочного титанового сплава. *Современная электрометаллургия*, 4, 22–27.
Akhonin, S.V., Selin, R.V., Berezos, V.A. et al. (2016) Development of new high-strength titanium alloy. *Sovrem. Elektrometall.*, 4, 22–27.
7. Prilutsky V.P., Akhonin S.V. (2014) TIG welding of titanium alloys using fluxes. *Welding in the World*, 58(2), 245–251.

8. Schwab, S., Selin, R., Voron, M. (2023) *Welding materials for TIG welding, surfacing, and WAAM technology of titanium alloys*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-023-01464-z>
9. Yanko, T., Brener, V., Ovchinnikov, O. (2020) Production of spherical titanium alloy powders used in additive manufacturing from titanium scrap. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Science. Nantes, France, 10–14 June 2020, 321, 07008.
10. Prilutsky, V.P., Akhoniin, S.V., Schwab, S.L. et al. (2018) Effect of heat treatment on the structure and properties of titanium alloy VT22 welded joints produced by TIG-welding with flux-cored wire. In *Materials Science Forum*, 927, 119–125.

DEVELOPMENT OF METAL-CORED WIRE BASED ON T120 TITANIUM ALLOY

S.L. Shwab, R.V. Selin, S.B. Rukhanskyi

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

Application of high-strength titanium alloys in modern aircraft construction poses new challenges every year both to the developers of such alloys and to specialists in the field of joining materials. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a highly promising technology, which allows manufacturing complex-shaped large-sized parts from high added value materials. This technology is part of additive manufacturing processes, which uses metal wires as filler materials and the arc - as the energy source. The paper shows the application of the developed experimental metal-cored wire based on a promising local high-strength titanium alloy T120 in multilayer argon-arc surfacing. The joint microstructure, its microhardness and mechanical properties were studied. 10 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: high-strength titanium alloys, WAAM, TIG, metal-cored wire

Надійшла до редакції 28.02.2023



Гранти НАН України для підтримки наукової молоді



З метою підтримки молодих науковців установ НАН України, які мають вагомні наукові результати та підвищення ролі і виявлення майбутніх перспективних наукових керівних кадрів, а також для підтримки наукових досліджень, що спрямовані на створення нових технологій, матеріалів, іншої наукоємної продукції кожного року Національна академія наук України проводить конкурс на здобуття грантів НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки (далі – гранти НАН України). Гранти НАН України фінансуються за рахунок коштів, передбачених у бюджеті НАН України за бюджетною програмою «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» за КПКВК 6541230. Відповідно до Положення про гранти НАН України вони надаються з метою заохочення до активної діяльності в наукових установах НАН України молодих вчених, які мають вагомні наукові результати, підтвержені публікаціями в провідних вітчизняних і закордонних фахових виданнях та досвід участі в міжнародних проектах або тривалого стажування у провідних наукових центрах за кордоном. Також надання грантів НАН України має на меті запобігти від'їзду талановитої молоді за кордон та створення умов для повернення в Україну молодих науковців, що працюють за кордоном; виявлення перспективних майбутніх наукових керівних кадрів; підтримки і розвитку співпраці молодих вчених НАН України з зарубіжними партнерами шляхом надання можливості стажування за кордоном та участі в міжнародних конференціях. Гранти НАН України спрямовані на проведення молодими вченими фундаментальних наукових досліджень, а також досліджень, які спрямовано на створення нових технологій, матеріалів, іншої наукоємної продукції.

Грант може отримати колектив молодих вчених, всі учасники якого, на момент оголошення конкурсу, відповідають визначенню терміну «молодий вчений» відповідно до Закону України «Про наукову і науково-технічну діяльність». Гранти надаються на конкурсній основі, щорічно розмір гранту не може перевищувати 1 млн. грн. Керівник проекту за грантом повинен мати досвід участі в міжнародних проектах не менше двох років та/або аналогічний період стажування в провідних наукових центрах за кордоном, та/або вагомні наукові результати, підтвержені публікаціями в провідних міжнародних виданнях. Колектив молодих вчених не може перевищувати п'яти осіб. Кошти гранту можуть включати витрати на проведення наукових відряджень, придбання витратних матеріалів, реактивів. Варто зазначити, що накладні витрати по даним проектам не можуть перевищувати 10 % від розміру наданого гранту. Строк проведення наукових досліджень за грантом – до двох років.

Від початку створення грантів НАН України проведено 4 конкурси, що загалом дало можливість профінансувати 139 наукових проекти. З початком повномасштабної війни та скорочення бюджетного фінансування гранти НАН України у 2022 р. були профінансовані в повному обсязі, що склало 50 млн грн. Черговий конкурс на здобуття грантів НАН України має відбутися у вересні 2023 р.

Крім цих грантів НАН України існують й інші форми підтримки молодих вчених НАН України. Зокрема це конкурс проєктів науково-дослідних робіт молодих учених НАН України; заслуховування наукових повідомлень молодих вчених на засіданнях Президії НАН України, вчені-доповідачі яких мають змогу відкрити додаткові річні відомчі теми. Заслугують на увагу стипендіальні програми НАН України та нова програма постдокторальних досліджень. Детальніше про гранти НАН України та інші форми підтримки молодих вчених, оголошення конкурсів та умови їх проведення можна дізнатись на сайтах Наукової молоді НАН України (www.nas.gov.ua/young) та Ради молодих вчених України (<https://ysc-nasu.org.ua/>).

Повідомлення підготували: асоційований член Ради молодих вчених НАН України Сергій Шваб та секретар Комісії по роботі з науковою молоддю НАН України Олександр Дуброва.

ВПЛИВ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО ПРОШАРКУ СИСТЕМИ CrMnFeCoNi НА МІКРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ З ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ EI437Б

В.Ф. Горбань¹, Ю.В. Фальченко², Л.В. Петрушинець², Т.В. Мельниченко², М.О. Крапівка¹,
Д.Г. Вербило¹, В.А. Назаренко¹

¹Інститут проблем матеріалознавства НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: falchenko@paton.kiev.ua

Представлено результати досліджень з дифузійного зварювання жароміцного сплаву EI437Б з використанням в якості проміжного прошарку фольги з високоентропійного сплаву системи CrMnFeCoNi. Наведено особливості отримання фольги з високоентропійного сплаву та її основні фізико-механічні властивості в стані після прокатки і відпалу. Збільшення ступеню загальної деформації фольги до 99,9 % призводить до росту межі плинності до трьох разів, а подальший відпал – до її зниження до значень, характерних для сплаву EI437Б. В процесі дифузійного зварювання в зоні з'єднання, що відповідає високоентропійному сплаву, модуль Юнга збільшився зі 165 до 195 ГПа, що може свідчити про проходження дифузійного перерозподілу елементів в прошарку. Розподіл хімічних елементів в зоні з'єднання свідчить про їх достатньо високу дифузійну рухливість. Показано, що використання при дифузійному зварюванні в вакуумі прошарку з високоентропійного сплаву забезпечує формування доволі однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу основних легуючих елементів, при цьому внаслідок термодформаційного впливу відбувається вирівнювання характеристик твердості та модуля пружності різних ділянок з'єднання, вони стають близькі за своїми фізико-механічними властивостями. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: високоентропійний сплав, жароміцний сплав на основі нікелю, дифузійне зварювання в вакуумі, мікроструктура, твердість, модуль пружності, межа плинності

Вступ. Завдяки підвищеним механічним властивостям при високих температурах, а також стійкості до повзучості та окислення жароміцні сплави на основі нікелю широко використовуються при виробництві елементів газотурбінних двигунів, роторів і дисків [1]. Для виготовлення подібних деталей та їх ремонту в процесі експлуатації існує необхідність в розробці надійних методів зварювання. Використання зварювання плавленням часто призводить до утворення гарячих тріщин в зоні термічного впливу через процеси ліквідації, мікросегрегації та нерівноважних фазових перетворень, що виникають під час кристалізації рідкої фази [2–5]. Такі з'єднання потребують обов'язкової термообробки після зварювання для модифікації мікроструктури зварного шва та зниження залишкових зварювальних напружень.

Виходячи зі сказаного вище методи зварювання в твердій фазі є більш перспективними. Ці процеси не передбачають розплавлення основного металу та його макроскопічної деформації. Зокрема, в публікаціях [6, 7] показана можливість отримання з'єднань зі сплавів на основі нікелю методом дифузійного зварювання. Попередні дослідження авторів показали доцільність використання при дифузійному зварюванні важкозварюваних матеріалів проміжних прошарків, зокрема,

багатошарових фольг, отриманих методом електронно-променевого пошарового осадження компонентів в вакуумі [8, 9]. Новим перспективним матеріалом для застосування в якості проміжних прошарків є фольги з високоентропійних сплавів (ВЕС), які мають в своєму складі елементи, що входять до складу жароміцних сплавів. ВЕС в процесі зварювання мають сприяти протіканню дифузійних процесів з формуванням у стикі однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів.

У 2004 р. J.W. Yeh зі співавторами [10] показав, що багатокомпонентні сплави завдяки високій ентропії можуть утворювати тверді розчини. У роботах [10, 11] були розроблені наукові засади і сформульовано формальні критерії належності матеріалу до нового класу сплавів, які отримали назву «високоентропійні сплави» внаслідок наявності високої, у порівнянні з традиційними сплавами, ентропії змішування у рідкому стані. Дані публікації дали поштовх до активізації роботи в цій області, а сама назва «високоентропійні сплави» стала позначенням даного класу матеріалів. Згідно критеріїв ВЕС повинні мати щонайменше 5 елементів з концентрацією кожного в діапазоні від 5 до 35 ат. %.

Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Петрушинець Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>,

Мельниченко Т.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1460-5532>, Вербило Д.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4375-7172>

© В.Ф. Горбань, Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, Т.В. Мельниченко, М.О. Крапівка, Д.Г. Вербило, В.А. Назаренко, 2023

Високоентропійні сплави характеризуються можливістю утворення простих твердих розчинів на базі п'яти і більше елементів. Однією з основних переваг високоентропійних сплавів є поєднання високої міцності та пластичності, що дозволяє деформувати їх при кімнатній температурі [12, 13]. Треба зазначити, що кількість публікацій по застосуванню ВЕСів в якості проміжних прошарків при дифузійному зварюванні незначна.

Метою даної роботи є дослідження можливості використання прошарків у вигляді фольги з високоентропійного сплаву при дифузійному зварюванні жароміцного сплаву на нікелевій основі, а також визначення методом автоматичного мікроіндентування механічних властивостей отриманих з'єднань.

Матеріали та методика. В якості твердорозчинного ВЕСу на основі ГЦК гратки слугував сплав системи CrMnFeCoNi, в якому електронна концентрація була вище ніж 7,9 ел/ат. Плавку зливків проводили в атмосфері очищеного аргону електродуговим способом з невитратним вольфрамовим електродом на мідній водоохолоджуваній півсферичній ємності. Отримані зливки ВЕС розміром 25×80×25 мм та масою 400 г з метою гомогенізації складу переплавлялися 6...7 разів з подальшим охолодженням зі швидкістю 80... 100 °С/с. Фольгу завтовшки 70 мкм з високоентропійного сплаву отримували прокаткою з разовою деформацією 15...18 % без проміжних відпалів. Це дозволило сформувати дрібнокристалічну структуру в кінцевому продукті.

Зварювання нікелевого сплаву EI437B (Ni – 21,0 Cr – 2,65Ti – 0,92Al – 0,83Fe – 0,46Si – 0,25Mn, мас. %) проводили в установці для дифузійного зварювання У-394М виробництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. В якості нагрівача використовували електронно-променеву гармату кільцевої форми, яку встановлювали на рівні поверхонь, що зварювались. Температуру зварювання контролювали за допомогою хромель-алюмелевої термопарі. Вакуум в робочій камері підтримували на рівні $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Були обрані наступні параметри зварювання: температура 1050 °С, тиск 20 МПа, тривалість витримки 20 хв [8]. Порізку зразків для зварювання проводили на електроерозійному верстаті. Поверхні зразків, які підлягали зварюванню, шліфували на алмазному крузі та знежирювали в етиловому спирті.

Мікροструктурні дослідження зварних з'єднань проводили за допомогою електронного мікроскопу CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу Oxford Inca Energy 200 для визначення хімічного складу. Для цього за стандартною методикою з використанням шліфу-

вально-полірувального обладнання фірми Struers були підготовлені шліфи поперечного перерізу зварних з'єднань.

Твердість (H) та модуль пружності (E) визначали відповідно до міжнародного стандарту [14] за допомогою автоматичного індентування (прилад «Мікрон-гамма») з пірамідою Берковича при навантаженні 50 г і відстанню між відбитками 40 мкм. При обчисленні модуля пружності для всіх сплавів коефіцієнт Пуассона дорівнював 0,25.

Результати та їх обговорення. В роботі досліджено характеристики високоентропійного сплаву системи CrMnFeCoNi в литому стані, після прокатування та після проведення процесу дифузійного зварювання жароміцного сплаву EI437B через проміжний прошарок з даного ВЕСу. Сплав системи CrMnFeCoNi був вибраний з урахуванням того, що до його складу входять основні легуючі елементи нікелевого сплаву, при цьому температура плавлення трохи нижча ніж у жароміцного сплаву і за даними ДТА вона складала 1352 °С (проти 1450 °С для EI437B).

Результати впливу деформації на механічні властивості литого сплаву CrMnFeCoNi, які отримали методом випробувань на розтяг, представлені в табл. 1.

Як видно з табл. 1 при ступені деформації сплаву CrMnFeCoNi 50 % його міцність зростає в 1,2 рази в порівнянні з властивостями сплаву в литому стані. При збільшенні ступеня деформації до 92,0...99,9 % у ВЕСі спостерігається збільшення міцності в 1,8...2,9 рази при одночасному зниженні його пластичності.

У зв'язку з тим, що дифузійне зварювання проходить при температурі близько 1100 °С, проведено визначення властивостей фольги після відпалу впродовж 30 хв за даної температури. У табл. 2 представлені фізико-механічні властивості фольги з ВЕСу CrMnFeCoNi у деформованому стані та після відпалу, що отримані методом інструментально-го індентування та випробуваннями на розтяг.

Деформація високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi до 99,9 % призводить до формування дрібнокристалічної структури, наслідком чого є суттєве зростання межі плинності до 1,902 ГПа, а також показника нормованої твердості H/E_r до 0,036. Таке значення нормованої твердості за да-

Таблиця 1. Механічні властивості сплаву системи CrMnFeCoNi, які отримали методом випробувань на розтяг, в залежності від ступеня деформації

Стан сплаву системи CrMnFeCoNi	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ε_{es} , %
Литий	565	647	24
Деформація 50 %	754	783	0,72
Деформація 92 %	1127	1175	1,17
Деформація 99 %	1352	1404	1,21
Деформація 99,9 %	1886	1902	0,37

Таблиця 2. Порівняння фізико-механічних властивостей фольги з високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi у деформованому стані та після відпалу за режимом 1100 °С впродовж 30 хв і жароміцного сплаву ЕІ437Б

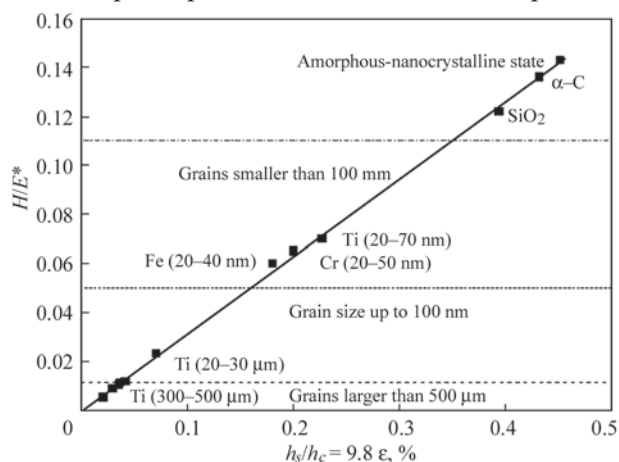
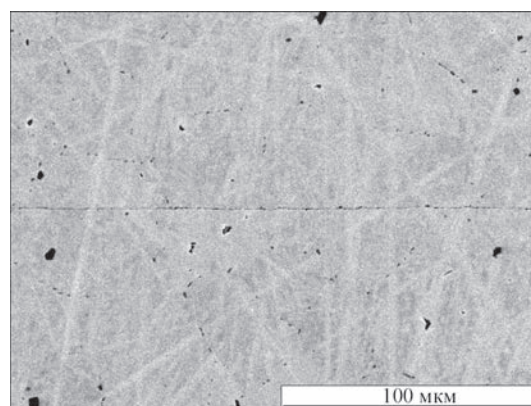
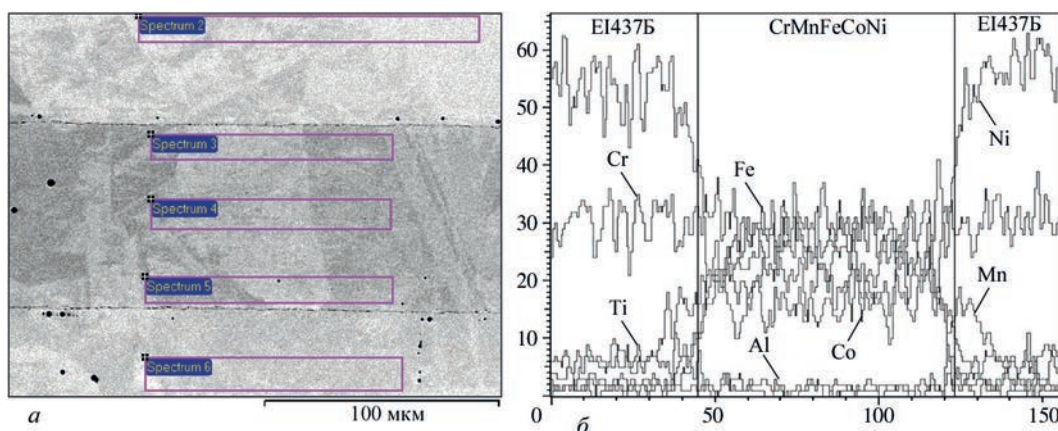
Сплав	Стан матеріалу	H_{TP} , ГПа	H/E_r	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, ГПа	δ , %
CrMnFeCoNi	Деформація 99,9 %	6,0	0,036	165	1,902	0,37
	Відпал	2,6	0,016	165	0,712	23
Сплав ЕІ437Б	Деформований + відпал	2,7	0,012	210	0,786	25

ними [15] (рис. 1) характерне для більшості матеріалів в дрібнокристалічному стані. Відпал ВЕСу призводить до суттєвої зміни показників міцності і пластичності та наближення їх значень до відповідних характеристик сплаву ЕІ437Б.

Способом дифузійного зварювання у вакуумі було отримано з'єднання з сплаву ЕІ437Б без використання проміжних шарів. Встановлено, що за даних параметрів в зоні з'єднання спостерігається

значна кількість дефектів у вигляді суцільного ланцюжка пор і оксидних включень (рис. 2).

Високу дефектність зони з'єднання можна пояснити низькою пластичністю жароміцного нікелевого сплаву, яка не дозволяє на заданому режимі забезпечити достатню деформацію приповерхневих шарів металу, і як наслідок неможливість сформувати повний фізичний контакт поверхонь, що зварюються.

Рис. 1. Співвідношення між H/E та $h_s/h_c = 9,8 \% \epsilon$ для матеріалів у різних структурних станах [15]Рис. 2. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ЕІ437Б + ЕІ437Б, отриманого на режимі: $T_{зв} = 1050$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв

Номер спектру	Вміст елементів, мас. %						
	Al	Ni	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
2	0,70	2,49	20,71	—	0,76	—	75,34
3	—	—	19,27	15,95	20,00	21,04	23,74
4	—	—	19,33	18,74	20,52	21,52	19,90
5	—	—	19,86	14,88	19,61	21,32	24,33
6	0,83	2,85	21,17	—	0,72	—	74,43

Рис. 3. Мікроструктура (а) та розподіл елементів (б, в) в зварному з'єднанні ЕІ437Б + CrMnFeCoNi + ЕІ437Б, отриманому на режимі: $T_{зв} = 1050$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв

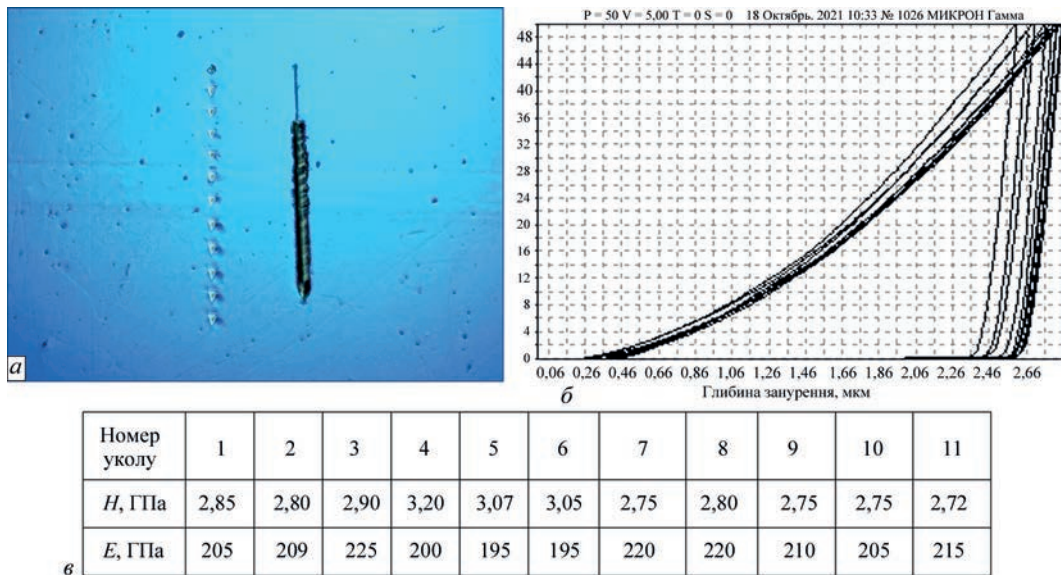


Рис. 4. Результати автоматичного індентування з'єднання E1437B + CrMnFeCoNi + E1437B, отриманого на режимі $T_{зв} = 1050$ °C, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв: *a* – відбитки, отримані при індентуванні; *б* – діаграми індентування в координатах навантаження–глибина занурення індентора; *в* – таблиця розрахунків

Далі проводили ДЗВ сплаву E1437B з використанням прошарку з високоентропійного сплаву системи CrMnFeCoNi в стані після прокатки.

Аналіз мікроструктури отриманих з'єднань показує, що в стику формується зона з'єднання (~70 мкм), вздовж межі розділу E1437B/ВЕС спостерігаються ланцюжки дрібних пор (рис. 3, *a*). Розподіл хімічних елементів в зоні з'єднання свідчить про їх достатньо високу дифузійну рухливість. ВЕС забезпечує формування доволі однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу основних легуючих елементів (рис. 3, *б*, *в*).

Методом інструментального індентування були визначені характеристики твердості та модуля пружності різних ділянок з'єднання після зварювання. На рис. 4, *a* представлено вигляд поперечного перерізу зварного з'єднання E1437B + CrMnFeCoNi + E1437B з відбитками від індентору. Відповідно до даних твердості та модуля пружності видно, що було отримано досить однорідне за своїми властивостями з'єднання (рис. 4, *б*, *в*). В процесі зварювання твердість і модуль пружності шару ВЕС близькі до значень основного матеріалу. Варто відмітити, що в процесі дифузійного зварювання модуль Юнга високоентропійного прошарку збільшився зі 165 до 195 ГПа. Це свідчить про проходження дифузійного перерозподілу елементів в прошарку, що підтверджується даними розподілу елементів на рис. 3, *б*.

Висновки

1. Визначено фізико-механічні властивості високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi в залежності від ступеня деформації. Показано, що збільшення ступеня загальної деформації до 99,9 % призводить до збільшення межі міцності з 647 до

1902 МПа. Після відпалу при температурі 1100 °C впродовж 30 хв межа плинності знижується з 1902 до 712 МПа, що близько до значень, характерних для сплаву E1437B ($\sigma_{0,2} = 786$ МПа).

2. Встановлено, що дифузійне зварювання в вакуумі жароміцного нікелевого сплаву E1437B на режимі: температура зварювання $T_{зв} = 1050$ °C, час зварювання $t_{зв} = 20$ хв і тиск $P_{зв} = 20$ МПа, не забезпечує формування якісних з'єднань. В зоні з'єднання спостерігається значна кількість дефектів у вигляді пор і оксидних включень.

3. Показано, що використання при дифузійному зварюванні жароміцного сплаву E1437B фольги з високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi забезпечує формування з'єднань з незначною кількістю дефектів в стику.

4. В процесі дифузійного зварювання модуль Юнга високоентропійного прошарку збільшився зі 165 до 195 ГПа, що може свідчити про проходження дифузійного перерозподілу елементів в прошарку.

5. На основі проведених досліджень можна стверджувати, що внаслідок термодформаційного впливу в процесі дифузійного зварювання відбувається вирівнювання характеристик твердості та модуля пружності різних ділянок зони з'єднання, вони стають близькі за своїми фізико-механічними властивостями.

Список літератури/References

1. Penkalla, H.J., Wosik, J., Czyrska-Filemonowicz, A. (2003) Quantitative microstructural characterisation of Ni-base superalloys. *Materials Chemistry and Physics*, 2–3, 81, 417–423. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00037-3)
2. Egbewande, A.T., Buckson, R.A., Ojo, O.A. (2010) Analysis of laser beam weldability of Inconel 738 superalloy. *Materials Characterization*, 5, 61, 569–574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.02.016>
3. Ojo, O.A., Richards, N.L., Chaturvedi, M.C. (2008) Heat affected zone liquation cracking in electron beam welded

- third generation nickel base superalloys. *Materials Science and Engineering: A*, **1–2**, 476, 217–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.091>
4. Rush, M.T., Colegrove, P.A., Zhang, Z., Courtot, B. (2010) An Investigation into Cracking in Nickel-Base Superalloy Repair Welds. *Advanced Materials Research*, 89–91, 467–472. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.89-91.467>
 5. Montazeri, M., Ghaini, F.M. (2012) The liquation cracking behavior of IN738LC superalloy during low power Nd:YAG pulsed laser welding. *Materials Characterization*, **67**, 65–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.02.019>
 6. Jiangtao Xiong, Lin Yuan, Yuan Zhub et al. (2019) Diffusion bonding of nickel-based superalloy GH4099 with pure nickel interlayer. *Journal of Materials Science*, **8**, 54, 6552–6564. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03274-x>
 7. Sung Hwan Kim, Chaewon Kim, Changheui Jang (2018) Diffusion Bonding of a Cold-Worked Ni-Base Superalloy. *Proceedings of the ASME 2018 Symposium on Elevated Temperature Application of Materials for Fossil, Nuclear, and Petrochemical Industries ETAM2018 (Seattle, April 3–5), Seattle, WA, USA*, 1–6. <https://doi.org/10.1115/ETAM2018-6716>
 8. Петрушинець Л.В., Фальченко Ю.В., Устинов А.І. та ін. (2017) Дифузійне зварювання у вакуумі жароміцного сплаву на Ni основі. *Технічні науки та технології*, **3(9)**, 63–71. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2017-3\(9\)-63-71](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2017-3(9)-63-71)
 9. Falchenko, Iu.V., Petrushynets, L.V., Melnichenko, T.V. et al. (2019) Vacuum diffusion welding of γ -TiAl intermetallic with high-temperature nickel alloy with application of intermediate Al/Ni nanolayers. *The Paton Welding Journal*, **10**, 48–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.10.07>
 10. Yeh, J.W., Chen, L., Lin, S.J., Chen, S.K. (2007) High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation. *Materials Science Forum*, **560**, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1>
 11. Murty, B.S., Yeh, J.W., Ranganathan, S. (2014) *High Entropy Alloys*. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-12-800251-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-14235-3>
 12. Karpets', M.V., Myslyvchenko, O.M., Krapivka, M.O. et al. (2015) Influence of Plastic Deformation on the Phase Composition, Texture, and Mechanical Properties of the CrMnFeCoNi₂Cu HighEntropy Alloy. *Journal of Superhard Materials*, **1**, 37, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457615010049>
 13. Podolskiy, A.V., Tabachnikova, E.D., Voloschuk, V.V. et al. (2018) Mechanical properties and thermally activated plasticity of the Ti₃₀Zr₂₅Hf₁₅Nb₂₀Ta₁₀ high entropy alloy at temperatures 4.2–350 K. *Materials Science and Engineering: A*, **1**, 710, 136–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.073>
 14. ISO UNE EN ISO 14577-1:2016 *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method (ISO 14577-1:2015)*.
 15. Gorban, V.F., Pechkovskii, E.P. (2010) Instrumented indentation for determining the structural state of materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **49**, 424–429. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-010-9253-1>

INFLUENCE OF HIGH-ENTROPY INTERLAYER OF CrMnFeCoNi SYSTEM ON MICROMECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS OF HIGH-TEMPERATURE ALLOY EI437B

V.F. Gorban¹, Iu.V. Falchenko², L.V. Petrushinets², T.V. Melnichenko², M.O. Krapivka¹,
D.G. Verbilo¹, V.A. Nazarenko¹

¹Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine. 3 Krzhyzhanovskoho Str., 03142, Kyiv, Ukraine.

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: falchenko@paton.kiev.ua

The paper presents the results of investigations on diffusion welding of high-temperature alloy EI437B, using foil from high-entropy alloy of CrMnFeCoNi system as an interlayer. The features of producing foil from high-entropy alloy and its main physical-chemical properties in as-rolled and as-annealed condition are given. Increase of the degree of the foil general deformation to 99.9 % results in up to three times increase of the yield limit, and further annealing of the foil leads to its lowering to values characteristic for EI437B alloy. During diffusion welding the Young's modulus increased from 165 to 195 GPa in the joint zone corresponding to the high-entropy alloy, which may be indicative of a diffusion-induced redistribution of elements in the interlayer. Chemical element distribution in the joint zone is indicative of their sufficiently high diffusion mobility. It is shown that application of a high-entropy alloy interlayer in vacuum diffusion welding ensures formation of a diffusion zone of a rather homogeneous chemical composition with a monotonic nature of distribution of the main alloying elements. The thermo-deformational impact results in equalizing of the characteristics of hardness and modulus of elasticity in different regions of the joint, and their physical-mechanical properties become similar. 15 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: high-entropy alloy, nickel-based high-temperature alloy, vacuum diffusion welding, microstructure, hardness, modulus of elasticity, yield limit

Надійшла до редакції 22.03.2023

КАТАЛОГ РОЗРОБОК ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Каталог (2023 р., мова англійська, 32 стор., формат А4) включає перелік сучасних розробок, які проводить Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в наступних напрямках досліджень:

- зварювання та споріднені технології з'єднання та обробки перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, фізико-хімічні процеси при їх реалізації;
- фізична та конструкційна міцність матеріалів, зварних з'єднань і конструкцій, їх діагностика і подовження ресурсу експлуатації та стандартизація;
- автоматизація та роботизація технологій з'єднання та обробки матеріалів, математичне моделювання процесів та інформаційні технології;
- створення нових функціональних, конструкційних та наноматеріалів методами спеціальної електротметалургії та з застосуванням висококонцентрованих потоків енергії;
- нові процеси і технології нанесення покриттів різного призначення та інженерія поверхні;
- матеріали, технології та виробництво медичного призначення;
- адитивні технології отримання виробів і елементів конструкцій на основі лазерних, електронно-променевих та дугових джерел енергії;
- технології ремонту та відновлення інфраструктурних та промислових об'єктів.

Каталог можна замовити в редакції журналу

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ЦИРКОНІЄВИХ ЧАСТИНОК ПРИ МІКРОПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЕННІ

С.М. Калюжний¹, В.В. Савицький¹, С.Г. Войнарович¹, О.М. Кислиця¹, З.Г. Файзраманов²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: serg3319@ukr.net

²Східно-Казахстанський технічний університет ім. Д. Серикбаєва. 070004, Казахстан, м. Усть-Каменогорськ, вул. Протозанова, 69. E-mail: kanc_ekstu@mail.ru

У роботі проведено вимірювання та аналіз швидкості руху диспергованих частинок із цирконієвого дроту, введеного в дуговий проміжок мікроплазмового струменя залежно від технологічних параметрів процесу розпилення. З використанням оптичних цифрових пристроїв було встановлено, що в даних досліджуваних діапазонах режимних параметрів середня швидкість диспергованих цирконієвих частинок становить від $8 \pm 2,5$ до $28,7 \pm 4$ м/с. Установлено, що у разі комбінації мінімальних значень сили струму ($I = 16$ А), витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{\text{пл}} = 160$ л/год) та швидкості введення дроту ($V_{\text{др}} = 2,9$ м/хв), що розпилюється, забезпечується утворення частинок з максимальним діаметром 310 мкм і середньою швидкістю їх руху $8 \pm 2,5$ м/с. Застосування даних показників режимних параметрів при мікроплазмовому процесі розпилення цирконієвого дроту дозволить формувати покриття з розвинутою поверхнею та найбільш пористою структурою, які можуть практично застосовуватись на поверхнях ендопротезів безцементного фіксування. Бібліогр. 21, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: мікроплазмове покриття, цирконій, диспергація, швидкість частинок

Вступ. Формування покриттів з використанням високотемпературного плазмового струменя набуло широкого поширення в різних галузях промисловості. Успішність використання плазмового дротяного розпилення в промисловості підтверджується позитивними практичними результатами [1–3]. Завдяки високій продуктивності, простоті та технологічності плазмовий метод дає змогу розпилювати різного роду матеріали, такі як кераміка та метали, у вигляді порошків, шнурів і дротів.

Відмінною особливістю плазмового напилення із дроту від порошкових матеріалів полягає в тому, що гранулометричний склад напилюваних частинок, формується під час процесу диспергування дроту в плазмовому струмені. При цьому від розмірів диспергованих частинок буде залежати їх швидкість у момент удару об напилювану поверхню, внаслідок чого їх деформування впливатиме на структуру покриття [4]. Відомо, що найбільш щільні структури формуються частинками, які рухалися з достатньо високими швидкостями. Такі високі швидкості частинки можуть отримувати у випадку їхнього руху в струмені холодного газодинамічного, детонаційного, високошвидкісного газополуменевого та плазмового методу [5, 6].

При плазмовому напиленні з дроту процес диспергування відбувається за умови плавлення та відриву утвореної краплі розплаву з торця дроту,

що подається в плазмовий струмінь. Процес плавлення дроту залежить від декількох основних факторів, якими є теплофізичні властивості розпилюваного матеріалу та плазмового струменя. При цьому плазмовий струмінь повинен мати достатні не тільки теплові, але й динамічні властивості для забезпечення диспергування частинок із дроту [7]. Таким чином, процес диспергування частинок із дроту буде залежати від властивостей плазмового струменя, який впливатиме на їх розмір та швидкість руху. Розміри та швидкості руху диспергованих частинок будуть залежати від зміни теплофізичних та динамічних властивостей плазмового струменя в радіальному напрямку. Зокрема, від глибини введення дроту в плазмовий струмінь буде залежати в якій області відносно радіальної осі струменя розпочнеться процес його плавлення та формування краплі на його торці [8].

Одним з різновидів методів плазмового напилення, за допомогою якого одержують покриття розпиленням дротяних матеріалів, є метод мікроплазмового напилення (МПН). Особливістю даного методу є використання малопотужного мікроплазмотрона до 2,5 кВт. Його конструкційна відмінність полягає у виносному аноді, що дозволяє розпилювати дротяний матеріал, безпосередньо подаючи його у високотемпературну область мікроплазмового струменя, яким є дуговий проміжок перед анодною плямою та формуванням

Калюжний С.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8132-3930>, Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>, Войнарович С.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4329-9255>, Кислиця О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-8894-4660>, Файзраманов З.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-3654-2368>

© С.М. Калюжний, В.В. Савицький, С.Г. Войнарович, О.М. Кислиця, З.Г. Файзраманов

поток диспергованих частинок із мінімальним кутом розкриття [9]. В якості плазмоутворюючого та захисного газу використовується аргон. При цьому застосування співвідносної подачі захисного газу під час наплення сприяє обтисканню мікроплазмового струменя з його стабілізацією та обмеженням підмішування атмосферних газів, що дозволяє мінімізувати процеси окислення розпилюваного матеріалу. За допомогою цього обладнання розпилюючи дротяні матеріали можна формувати різні функціональні покриття, зокрема й біосумісні [10].

На сьогодні дослідження руху частинок у високотемпературних газових потоках проводиться на комерційних установках DPV-2000, Accuraspray-g3, SprayWatch та інші [11]. Однак через їх високу вартість виникла потреба в розробці нових, більш доступних методів контролю за рухом диспергованих частинок у високотемпературних потоках. Дані методи засновані на використанні оптичних пристроїв і базуються на високошвидкісному фільмуванні для виявлення об'єктів спостереження з метою подальших вимірів їх параметрів [12]. Однією з найпоширеніших на практиці методик дослідження швидкоплинних процесів є оптико-електронна система, яка була успішно застосована Богдановичем і Доукуїною [13, 14]. Із застосуванням подібної методики процес руху диспергованих частинок у потоці плазмового струменя вивчено досить добре, але напрямок досліджень стосувався переважно схеми реалізації процесу з використанням високопотужних джерел плазмового струменя та подачі дроту для його розпилення за межі високотемпературного дугового проміжку [15]. При цьому практичні роботи щодо визначення залежності швидкості руху диспергованих частинок в плазмовому струмені від технологічних параметрів в умовах малопотужних плазмотронів до 3 кВт на сьогодні залишаються поза увагою дослідників. Тому велике значення для кращого розуміння перебігу процесу мікроплазмового дротяного розпилення має встановлення впливу технологічних параметрів на швидкість руху диспергованих частинок в умовах мікроплазмового струменя.

Таким чином, мета роботи полягала в експериментальному визначенні впливу режимних параметрів, таких як сила струму (I , А), витрата плазмоутворюючого газу ($Q_{пл}$, л/год), швидкість подачі дроту ($V_{др}$, м/хв) на швидкість руху диспергованих частинок, отриманих із Zr-дроту в умовах мікроплазмового струменя.

Матеріали, обладнання та методики проведення експерименту. Для планування експерименту із встановленням впливу параметрів режимів МПН Zr-дроту на швидкості руху диспергованих частинок був використаний метод багатофакторного математичного планування з матрицею 2^3 .

Швидкість подачі дроту встановлювали виходячи з того, що стабільний процес диспергування відбуватиметься за умови, коли тиск, створюваний мікроплазмовим струменем і маса краплі, утвореної на торці дроту, перевищуватиме силу поверхневого натягу її розплаву [16]. Тож стабільний процес диспергування дроту, введеного в мікроплазмовий струмінь, відбуватиметься за достатньої кількості теплоти (G_n), яка визначається шляхом розрахунків. При цьому необхідна кількість теплоти струменя буде залежати від одиниці введеного об'єму розпилюваного матеріалу, його діаметра та теплофізичних властивостей:

$$G_n = (c_p (T_n - T_0) + C) \rho_{др} 0,01 \pi /4, \quad (1)$$

де c_p – теплоємність розпилюваного матеріалу; T_n – температура плавлення розпилюваного матеріалу; T_0 – початкова температура дроту 273 К; C – теплота плавлення розпилюваного матеріалу; $\rho_{др}$ – щільність розпилюваного матеріалу; $d_{др}$ – діаметр дроту.

Для розрахунку швидкості подачі дроту, що забезпечує його стабільне диспергування в середовищі мікроплазмового струменя, використовувалася формула (2), представлена в роботі [17]:

$$V_{др} = \frac{\alpha F (T_c - T_{др})}{G_n}, \quad (2)$$

де $\alpha = 856$ – коефіцієнт теплопередачі; $F = 0,000472 \text{ м}^2$ – площа теплообміну дроту; T_c – температура струменя; $T_{др}$ – температура плавлення дроту.

Проведені розрахунки по встановленню стабільного процесу розпилення Zr-дроту діаметром 0,3 мм в умовах мікроплазмового струменя показали, що необхідно забезпечити кількість теплоти $G_n \approx 3,2 \cdot 10^2$ Дж для плавлення 1 см довжини дроту, за умови його швидкості подачі 3,86 м/хв. Процес розпилення Zr-дроту досліджували на установці МПН-004 згідно зі спланованою матрицею експерименту, представленою в таблиці.

Для визначення швидкості руху диспергованих частинок в потоці мікроплазмового струменя, залежно від параметрів режиму розпилення, була розроблена експериментально-розрахункова методика, яка полягала в отриманні серії фотознімків

Таблиця. Параметри режиму розпилення Zr-дроту методом МПН

Номер	Сила струму I , А	Витрата плазмоутворюючого газу $Q_{пл}$, л/год	Швидкість подачі дроту $V_{др}$, м/хв
1	26	240	4,8
2	26	240	2,9
3	26	160	2,9
4	26	160	4,8
5	16	240	2,9
6	16	240	4,8
7	16	160	4,8
8	16	160	2,9

треків диспергованих частинок з часом експозиції 250...1000 мкс (не менше ніж 80 кадрів для кожного режиму МПН). Тривалість спостереження складала 15 с для кожного режиму згідно з таблицею. За рухом диспергованих частинок у потоці

мікроплазмового струменя на ділянці 150 мм від зрізу сопла спостерігали з використанням цифрової камери асА1300-200um (Basler, Німеччина), яка розміщувалась на штативі в камері для розпилення (рис. 1).



Рис. 1. Експериментальний стенд для дослідження швидкості руху диспергованих частинок

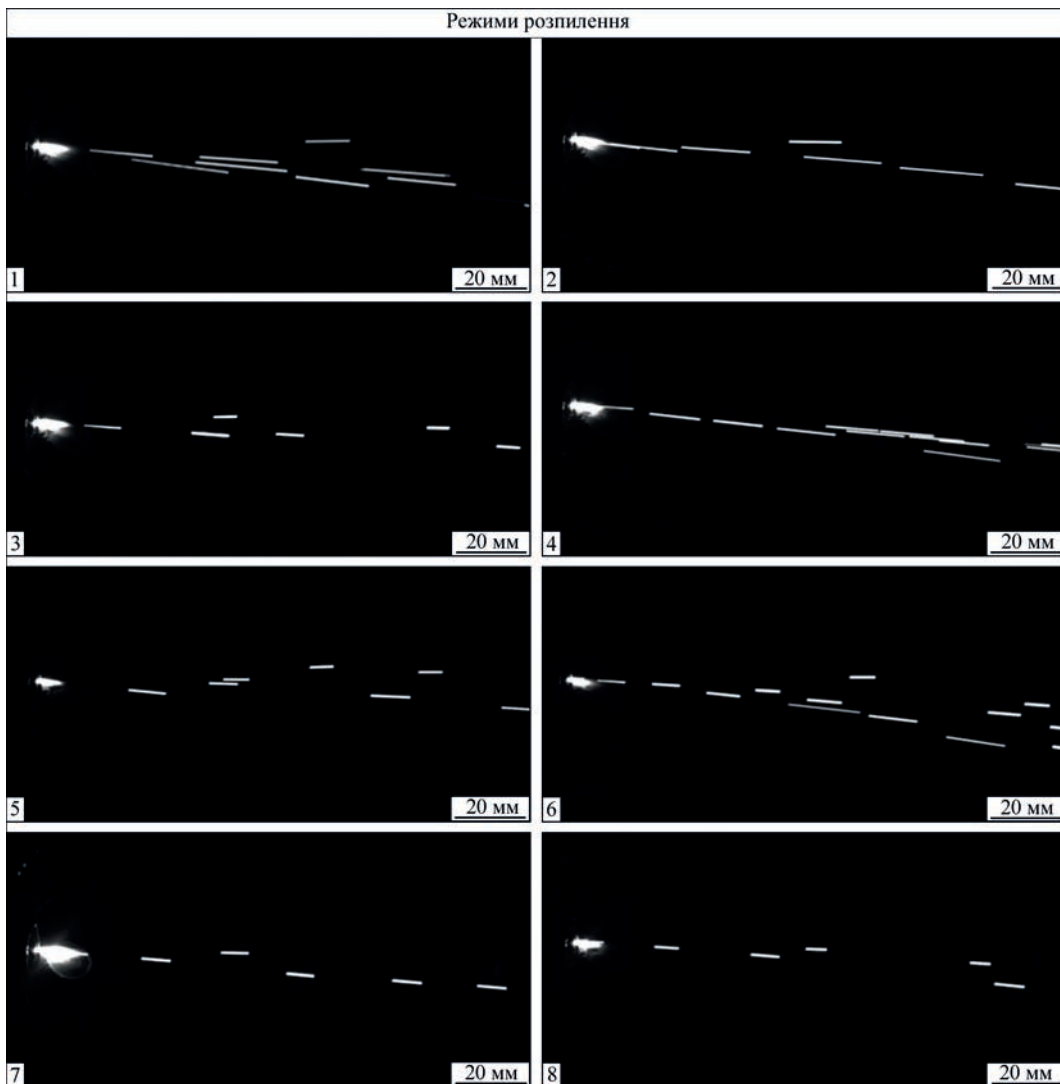


Рис. 2. Треки диспергованих частинок із Zr-дроту залежно від режиму МПН при часі експозиції 1 мс

Отримані серії зображень треків диспергованих частинок обробляли з використанням програмного забезпечення ImageJ (НИН, США), в якому проводили перетворення зображень для аналізу треків, з отриманням відповідного масиву статистичних даних їх довжини. Чим вища швидкість руху частинок, тим більша довжина треків на зображеннях. На основі даних про оптичне збільшення відеосистеми, розмір ділянки, на якій спостерігається рух частинок, час експозиції та довжину треку, можна розрахувати швидкість руху окремої частинки. З урахуванням описано-

го вище, проводилась обробка отриманого масиву даних на кількість співпадаючих треків диспергованих частинок і на основі аналізу гістограм швидкостей усіх зареєстрованих частинок за весь час встановлювали їхні середні швидкості руху в умовах мікроплазмового струменя відповідно до кожного режиму розпилення.

Результати дослідження та обговорення. У результаті проведення експерименту були отримані зображення диспергованих частинок, що світяться, у вигляді треків різної довжини (рис. 2), залежно від параметрів режиму МПН.

Обробка масиву даних із зображень треків диспергованих частинок дозволила встановити розподіл швидкостей їх руху в об'ємі мікроплазмового струменя та представити у вигляді гістограм (рис. 3). Аналіз гістограм (рис. 3) показав, що середня швидкість диспергованих частинок із Zr-дроту в мікроплазмовому струмені знаходиться в межах 28,7...8,0 м/с.

На основі аналізу отриманих результатів середніх швидкостей руху диспергованих частинок із Zr-дроту залежно від режиму МПН було встановлено, що швидкості руху частинок різняться, оскільки вони мають різні маси та геометричні розміри, які були визначені в попередніх наших дослідженнях [18]. Такі частинки мали сферичну форму, а їх середній діаметр (d_c) становив від 128 до 310 мкм. Дані співвідношення середньої швидкості та розміру диспергованих частинок залежно від параметрів режиму розпилення МПН представлена у вигляді гістограми на рис. 4.

Частинки з меншим розміром залишали довгі треки на зафіксованому кадрі й відповідно мали вищу швидкість руху (режими №№ 1, 2, 4, 6), а частинки з більшою масою рухалися з меншою швидкістю, що було зафіксовано у вигляді меншої довжини треку – режими №№ 3, 5, 7, 8 (рис. 2).

Відомо, що швидкість руху частинок $V_{\text{ч}}$ в потці плазмового струменя можна теоретично розрахувати, використовуючи рівняння (3) [19, с. 61].

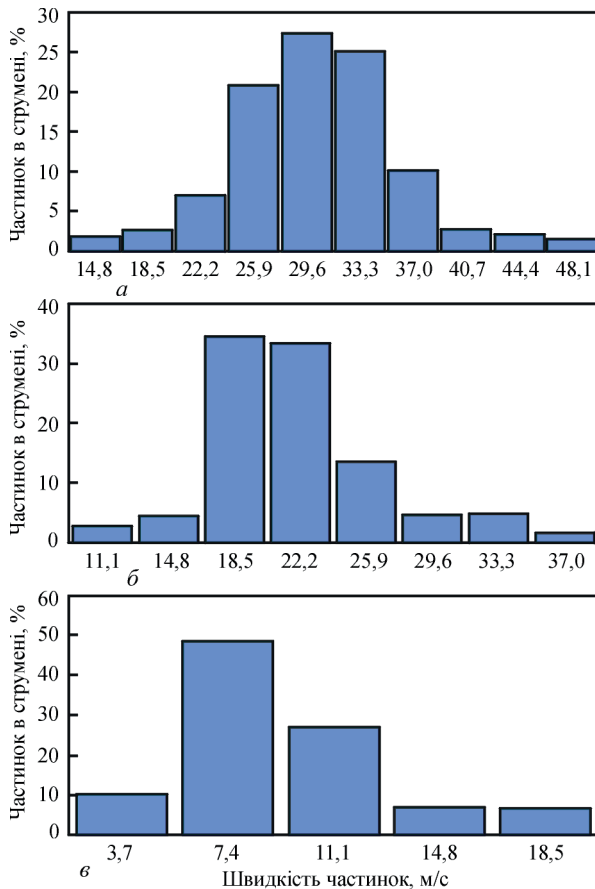


Рис. 3. Розподіл швидкостей диспергованих частинок в мікроплазмовому струмені відповідно до режиму розпилення: а – № 1; б – № 4, в – № 8

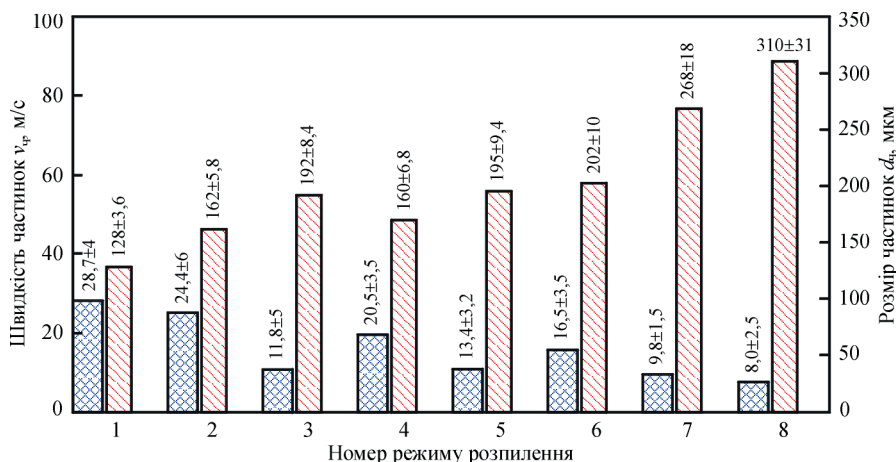


Рис. 4. Середні розміри та швидкості диспергованих частинок із Zr-дроту при різних режимах МПН

$$V_{\text{ч}} = V_{\text{г}} \sqrt{\frac{3 \rho_{\text{г}} C_d}{2 \rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}}}} x \quad (3)$$

де $V_{\text{г}} = (350...175)$ м/с – швидкість газу; $\rho_{\text{г}} = 0,048$ кг/м³ – щільність плазми; $\rho_{\text{ч}} = 6510$ кг/м³ – щільність розпилюваного матеріалу (частинки); $d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки; $C_d = 0,5$ – коефіцієнт опору частинки; x – шлях, пройдений частинкою.

Теоретичний розрахунок швидкості руху диспергованих частинок (рівняння 3) показав, що для розмірів частинок в діапазоні від 128 до 310 мкм їх швидкості руху становлять від 28 до 9 м/с відповідно, що практично збігаються з експериментальними даними. Проте в розрахунку (3) не було враховано факторів теплофізичної, термодинамічної зміни властивостей струменя газу з можливим його розрідженням, вплив дисперсної фази та випаровування частинок, при цьому форма частинок приймалася за сферичну без коагуляції з рівномірним завантаженням потоку, а коефіцієнти рівняння $\rho_{\text{г}}$, C_d і $V_{\text{г}}$ були сталими. Тож розбіжність в експериментальних і теоретичних даних швидкості руху диспергованих частинок пояснюється зміною властивостей плазмового струменя в радіальному напрямку, а початок процесу перенесення розплаву металу з торця дроту та рух диспергованих частинок у струмені можливий у різних областях плазмового струменя [7], що не було враховано в теоретичному розрахунку.

Приведені в літературі дані показників швидкостей диспергованих частинок схожі з отриманими в нашому дослідженні. Так, в дослідженнях Кудінова були представлені залежності швидкості

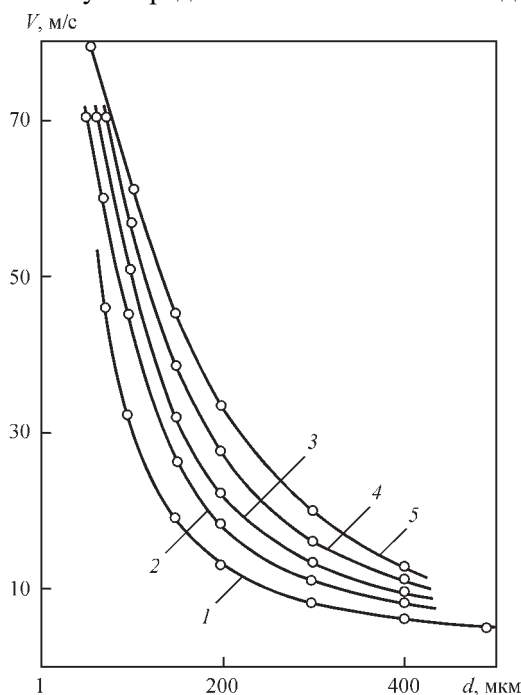


Рис. 5. Залежність осьової швидкості руху частинок ванадію при розпиленні дроту різною потужністю плазмотрона (1-2 кВт; 2-4; 3-6; 4-8; 5-10) від розмірів частинок [20]

руху диспергованих частинок у плазмовому струмені від їх діаметра (рис. 5), які свідчать, що при потужності плазмотрона в 2 кВт швидкість диспергованих частинок діаметром 100...300 мкм знаходиться в діапазоні від 30 до 8 м/с [20].

Проаналізувавши отримані дані середньої швидкості руху диспергованих частинок із Zr-дроту в мікроплазмовому струмені було встановлено, що вона обернено пропорційна їхнім геометричним розмірам і залежить від параметрів режиму розпилення МПН. Вплив технологічних параметрів МПН на швидкості руху диспергованих частинок із Zr-дроту в середовищі мікроплазмового струменя відображено в приведеному рівнянні регресії:

$$V_{\text{ч}}(\text{Zr}) = 0,94I + 0,10Q_{\text{пл}} + 2,36V_{\text{др}} - 32,79 \quad (4)$$

У разі малої швидкості подачі дроту формування крапель та прискорення диспергованих частинок відбуватиметься в периферійній області потоку мікроплазмового струменя, що характеризується мінімальною його швидкістю витoku та низькою в'язкістю. У такій області частинки розганятимуться до меншої швидкості, що спостерігається на режимах №№ 3, 5, 8 (рис. 4).

При зменшенні сили струму знижується температура мікроплазмового струменя. Своєю чергою зменшення витрат плазмоутворюючого газу призводить до зниження швидкості його витoku та до меншого динамічного тиску на краплю металу, внаслідок чого формуються частинки найбільшого розміру (310 мкм) із мінімальною швидкістю руху 8 м/с (режим № 8). В іншому випадку при збільшенні сили струму підвищується температура мікроплазмового струменя, яка впливає на перегрівання та зниження поверхневого натягу крапель розплаву металу, що в поєднанні з максимальною швидкістю витoku газу провокує до їхнього зривання з торця дроту через підвищений динамічний тиск. Такі поєднання факторів впливу дозволяють формувати частинки меншого розміру (128 мкм) і розганяти їх в струмені до максимальної швидкості руху 28,7 м/с, що спостерігається на режимі № 1 (рис. 4).

У результаті проведеного дослідження впливу режимних параметрів МПН на швидкості руху диспергованих частинок із Zr-дроту в середовищі мікроплазмового струменя встановлено, що за допомогою підбору технологічних параметрів можливо управляти швидкістю руху частинок розпилюваного матеріалу в межах 8...28,7 м/с. Найбільш вагомими факторами впливу в даному діапазоні досліджуваних параметрів є сила струму та витрати плазмоутворюючого газу, від яких значною мірою будуть залежати умови початку процесу формування краплі розплаву з наступною диспергацією.

Встановлені фактори впливу технологічних параметрів на швидкість руху цирконієвих частинок в мікроплазмовому струмені та їх залежність від геометричного розміру дозволяють краще розуміти цей процес, який у свою чергу забезпечить можливість прогнозування майбутніх властивостей покриття, що формується при МПН. Використання режиму № 8, який забезпечує формування частинок із найбільшим середнім розміром 310 ± 31 мкм та швидкістю руху до $8 \pm 2,5$ м/с, дозволить отримувати покриття з розвиненою морфологією поверхні та найбільш пористою структурою. Такі покриття знаходять практичне використання на ендопротезах безцементного фіксування, забезпечуючи об'єм для вrostання кісткової тканини внаслідок пористого простору на поверхні та в структурі покриття [21].

Висновки

1. Запропоновано розрахунково-експериментальну методику вимірювання швидкості руху диспергованих частинок з дротяних матеріалів, розпилених методом МПН, із використанням оптичної цифрової камери асА1300-200um (Basler, Німеччина) та програмного забезпечення ImageJ (NIH, США).

2. Проаналізовано вплив технологічних параметрів МПН у діапазоні зміни сили струму ($I = 16 \dots 26$ А), витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{\text{пл}} = 160 \dots 240$ л/год) і швидкості подачі дроту ($V_{\text{др}} = 2,9 \dots 4,8$ м/хв) на середні швидкості руху диспергованих частинок у мікроплазмовому струмені. Встановлено, що середні швидкості диспергованих частинок із Zr-дроту, поданого в дуговий проміжок мікроплазмового струменя, знаходяться в діапазоні від 8 до 28,7 м/с, а найбільш значущими технологічними факторами впливу є сила струму та витрата плазмоутворюючого газу.

3. На основі аналізу отриманих результатів середніх швидкостей руху диспергованих частинок із Zr-дроту показано, що швидкості руху частинок корелюють з їх масами та геометричними розмірами, при цьому середній діаметр частинок змінюється в межах 128...310 мкм. Встановлено, що найменша швидкість руху диспергованих частинок зі Zr-дроту складає 8 м/с та забезпечується при наступних технологічних параметрах: сила струму 16 А, витрати плазмоутворюючого газу 160 л/год і швидкість подачі дроту 2,9 м/хв, із формуванням частинок найбільшого діаметра – 310 мкм.

Список літератури

- Darut, G., Liao, H., Coddet, C. et al. (2015) Steel coating application for engine block bores by Plasma Transferred Wire Arc spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 268(25), 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.018>.
- O'Neil, N., Syed Kabir A. (2020) Pulsed Waterjet Roughening of Cast Iron and Aluminum Alloy for Automotive Engine Remanufacturing with Plasma Transferred Wire Arc

Coating. *Coatings*, 10(9), 864. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10090864>.

- Zhang, J., Dulal Saha C., Jahed, H. (2021) Microstructure and mechanical properties of plasma transferred wire arc spray coating on aluminum cylinder bores. *Surface and Coatings Technology*, 426(25), 127757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127757>.
- Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А. (2004) *Газотермическое напыление*. Балдаев Л.Х. (ред.), Москва, Маркет ДС.
- Kuzmin, V.I., Gulyaev, I.P., Sergachev, D.V. et al. (2021) Application of functional coatings by supersonic thermal plasma flows. *Journal of Physics Conference Series* 2131(5), 052053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052053>.
- Meeß, J., Anasenzl, M., Ossensbrink, R. et al. (2022) Influence of Particle Velocities on Adhesion Strength of Cold Spray Inner Diameter Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 2025–2038. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01439-4>.
- Краснов А.Н. Шаривкер С.Ю., Зильберберг В.Г. (1970) *Низкотемпературная плазма в металлургии*. Москва, Металлургия.
- Карп И.Н., Рудой А.П. (1991) Влияние скорости подачи стальной проволоки на диспергирование металла воздушной струей. *Автоматическая сварка*, 10, 36–38.
- Войнарович С.Г., Алонцева Д.Л., Хожанов А.Р. и др. (2021) Влияние параметров микроплазменного напыления циркониевых покрытий на потери напыляемого материала и пористость покрытий. *Вестник «КазНАЕН». Серия физическая*, 79(4), 8296.
- Alontseva, D., Ghassemieh, E., Voinarovych, S. et al. (2020) Manufacturing and characterization of robot assisted microplasma multilayer coating of Titanium implants. *Johnson Matthey Technol Rev*, 64(2), 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1595/205651320X15737283268284>.
- Mauer, G., Vaßen, R., Stöver, D. (2007) Comparison and Applications of DPV-2000 and Accuraspray-g3 diagnostic Systems. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(3), 414–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9047-2>.
- Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Попов В.А. и др. (2012) Методы оптической диагностики частиц в высокотемпературных потоках. *Ползуновский вестник*, 2(1), 4–7.
- Докукина И.А. (2012) Исследование скорости движения дисперсных частиц в плазменном потоке. *Известия Самарского научного центра РАН*, 14(6), 143–149.
- Богданович В.И. Гришанов В.Н., Докукина И.А. и др. (2011) Высокоскоростная видеосъемка для контроля процессов и оборудования плазменного газотермического нанесения покрытий. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 1, 113–118.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.04.04>.
- Борисов Ю.С. Кислица А.Н., Войнарович С.Г. (2006) Особенности процесса микроплазменного напыления с использованием проволочных материалов. *Автоматическая сварка*, 4, 26–31.
- Полущенко В.С., Пузряков А.Ф. (1978) Определение максимальной скорости плавления проволоки в плазменной струе. *Тез. докл. VII Всесоюз. совещ. Теория и практика газотермического нанесения покрытия*, сс. 104–107.
- Voinarovych, S.G., Alontseva, D.L., Kyslytsia, O.N. et al. (2021) Fabrication and characterization of Zr microplasma sprayed coatings for medical applications. *Advances in materials science*, 2(68), 93–105. DOI: <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0013>.
- Ющенко К.А., Борисов Ю.С. Кузнецов В.Д. та ін. (2007) *Інженерія поверхні*. Київ, Наукова думка.
- Кудинов В.В. (1977) *Плазменные покрытия*. Москва, Наука.
- Гайко Г.В., Підгаєцький В.М., Сулима О.М. та ін. (2022) Інститут травматології та ортопедії НАН України. *Ревізійний стегновий компонент ендопротеза з безцементною фіксацією*. Україна, Пат. 150555.

References

- Darut, G., Liao, H., Coddet, C. et al. (2015) Steel coating application for engine block bores by Plasma Transferred Wire Arc spraying process. *Surf. and Coat. Technol.*, 268(25), 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.018>.
- O'Neil, N., Syed Kabir A. (2020) Pulsed waterjet roughening of cast iron and aluminum alloy for automotive engine remanufacturing with plasma transferred wire arc coating. *Coatings*, 10(9), 864. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10090864>.
- Zhang, J., Dulal Saha C., Jahed, H. (2021) Microstructure and mechanical properties of plasma transferred wire arc spray coating on aluminum cylinder bores. *Surf. and Coat. Technol.*, 426(25), 127757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127757>.
- Baldaev, L.Kh., Borisov, V.N., Vakhalin, V.A. (2004) *Thermal spraying*. Ed. by L.Kh. Baldaev. Moscow, Market DS [in Russian].
- Kuzmin, V.I., Gulyaev, I.P., Sergachev, D.V. et al. (2021) Application of functional coatings by supersonic thermal plasma flows. *J. of Physics Conf. Series* 2131(5), 052053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052053>.
- Meeß, J., Anasenzl, M., Ossenbrink, R. et al. (2022) Influence of Particle Velocities on Adhesion Strength of Cold Spray Inner Diameter Coatings. *J. Thermal Spray Technol.*, 31, 2025–2038. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01439-4>.
- Krasnov, A.N., Sharivker, S.Yu., Zilberberg, V.G. (1970) *Low-temperature plasma in metallurgy*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Karp, I.N., Rudoj, A.P. (1991) Influence of speed of steel wire feeding on dispersion of metal by air jet. *Avtomatich. Svarka*, 10, 36–38 [in Russian].
- Voinarovich, S.G., Alontseva, D.L., Khodzhanov, A.P. et al. (2021) Influence of parameters of microplasma spraying zirconium coatings on sprayed material losses and porosity of coatings. *Vestnik KazNAEN. Seriya Fizicheskaya*, 79(4), 8296.
- Alontseva, D., Ghassemieh, E., Voinarovych, S. et al. (2020) Manufacturing and characterization of robot assisted microplasma multilayer coating of Titanium implants. *Johnson Matthey Technol Rev*, 64(2), 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1595/205651320X15737283268284>.
- Mauer, G., Vaßen, R., Stöver, D. (2007) Comparison and Applications of DPV-2000 and Accuraspray-g3 diagnostic Systems. *J. Thermal Spray Technol.*, 16(3), 414–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9047-2>.
- Gulyaev, P.Yu., Dolmatov, A.V., Popov, V.A. et al. (2012) Methods of optical diagnostics of particles in high-temperature flows. *Polzunovskiy Vestnik*, 2/1, 4–7 [in Russian].
- Dokukina, I.A. (2012) Study of movement speed of dispersion particles in plasma flow. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*, 14(6), 143–149 [in Russian].
- Bogdanovich, V.I., Grishanov, V.N., Dokukina, I.A. et al. (2011) High-speed video filming for control of process and equipment of plasma thermal spraying of coatings. *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii*, 1, 113–118 [in Russian].
- 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. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.04.04>.
- Borisov, Yu.S., Kislitsa, A.N., Voinarovich, S.G. (2006) Peculiarities of the process of microplasma wire spraying. *The Paton Welding J.*, 4, 21–25.
- Polushchenko, V.S., Puzryakov, A.F. (1978) Determination of maximal speed of wire melting in plasma jet. In: *Abstr. of Papers of 7th All-Union Meet. on Theory and Practice of Thermal Coating Deposition*, 104–107 [in Russian].
- Voinarovych, S.G., Alontseva, D.L., Kyslytsya, O.N. et al. (2021) Fabrication and characterization of Zr microplasma sprayed coatings for medical applications. *Advances in Materials Sci.*, 2(68), 93–105. DOI: <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0013>.
- Yushchenko, K.A., Borysov, Yu.S., Kuznetsov, V.D. et al. (2007) *Surface engineering*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Kudinov, V.V. (1977) *Plasma coatings*. Moscow, Nauka [in Russian].
- Gaiko, G.V., Pidgaetskyi, V.M., Sulyma, O.M. et al. (2022) *Revision hip component of endoprosthesis with cement-free fixation*. Ukraine Pat. 150555 Institute of Traumatology and Orthopedics, NANU [in Ukrainian].

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF VELOCITY OF ZIRCONIUM PARTICLES IN MICROPLASMA SPRAYING

S.M. Kalyuzhny¹, V.V. Savytsky¹, S.G. Voinarovych¹, O.M. Kyslytsya¹, Z.G. Fayzramanov²¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.E-mail: serg3319@ukr.net²D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. 69 Protosanov Str., 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.E-mail: kanc_ekstu@mail.ru

In the work the measurement and analysis of the velocity of dispersed particles from the zirconium wire introduced into the arc gap of the microplasma jet were performed depending on the technological parameters of the spraying process. Using optical digital devices, it was found that in the mentioned studied ranges of the mode parameters, the average velocity of dispersed zirconium particles ranges from 8 ± 2.5 to 28.7 ± 4 m/s. It was established that in the case of a combination of minimum values of current ($I = 16$ A), the flow rate of plasma-forming gas ($Q_{pl} = 160$ l/h) and the sprayed wire feed rate ($V_w = 2.9$ m/min), the formation of particles with a maximum diameter of 310 μ m and an average velocity of 8 ± 2.5 m/s is provided. The use of the mentioned values of the mode parameters in the microplasma process of zirconium wire spraying will allow forming a coating with a developed surface and the most porous structure, which can be practically applied on the surfaces of endoprostheses with a cementless fixation. 21 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: microplasma coating, zirconium, dispersion, particles velocity

Надійшла до редакції 16.03.2023



Міжнародна спеціалізована виставка
Енергозберігаюче обладнання та альтернативні джерела енергії
«ISTWE»

21–22 вересня 2023 р.

Національний комплекс «Експоцентр України» - ВДНГ

<https://vdng.ua>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В КОМПЗИТНОМУ ЗВАРНОМУ З'ЄДНАННІ ПЕРЕХІДНОЇ ВТУЛКИ КОЛЕКТОРА ДО ПАТРУБКА ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-440

А.А. Макаренко¹, О.В. Махненко²

¹НТК ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

В елементах обладнання та трубопроводів діючих атомних електростанцій (АЕС) використовувались композитні зварні з'єднання різнорідних матеріалів, як правило, сталей феритно-перлітного (бейнітного) і аустенітного класів. Значна різниця в хімічному складі основного і зварювальних матеріалів призводить до хімічної і структурної неоднорідності металу в зоні з'єднання, а за рахунок різниці в коефіцієнтах температурного розширення матеріалів в процесі зварювання та післязварювальної термообробки утворюються високі нерелаксовані залишкові напруження, які суттєво впливають на міцність, довговічність та корозійну стійкість елементів обладнання. Значні труднощі з експериментального виміру залишкових напружень ускладнюють їх врахування при визначенні ресурсу елементів обладнання атомних електростанцій. Пошкодження зварного з'єднання Ду-1100 вузла приварки перехідної втулки колектору теплоносія з нержавіючої сталі 08X18N10T до патрубку корпусу парогенератора зі сталі 22К є однією з проблем безпечної експлуатації атомних енергоблоків ВВЕР-440. При цьому відсутні систематизовані відомості про характер та причини виникнення цих пошкоджень. У зв'язку з цим методами математичного моделювання проведений аналіз мікроструктурного фазового складу і залишкових напружень, що виникають в даному з'єднанні при зварюванні, та їх вплив на ресурс зварного вузла. Аналіз результатів математичного моделювання теплових процесів, мікроструктурних фазових перетворень і напружено-деформованого стану (НДС) в композитному зварному з'єднанні показав, що при порушеннях технології наплавлення і зварювання при виготовленні парогенератора, а саме недотримання умов попереднього і супутнього підігріву ($T \geq 200$ °C), можлива наявність загартованих структур в ЗТВ металу патрубка (Ст22К) і зниження характеристик тріщиностійкості матеріалу. Визначені досить високі залишкові напруження розтягу на внутрішній поверхні композитного з'єднання, яка під час експлуатації контактує з корозійною середою теплоносія, а також в зоні примикання (сплавлення) матеріалу перлітної сталі патрубка до аустенітного металу зварного шву, в якій існує висока вірогідність утворення дефектів несущільності при зварюванні, що може негативно впливати на міцність і структурну цілісність зварного вузла патрубка парогенератора (ПГ) при подальшій довгостроковій експлуатації. Бібліогр. 17, рис. 15.

Ключові слова: композитне зварне з'єднання, парогенератор ПГВ-440, зона термічного впливу, мікроструктурні фазові перетворення, залишкові напруження, математичне моделювання

Вступ. Одним з найважливіших питань безпечної експлуатації та продовження ресурсу обладнання атомних електростанцій (АЕС) України є питання оцінки міцності, цілісності та працездатності вузлів зварних з'єднань, що потребує даних щодо залишкових напружень.

В елементах обладнання та трубопроводів діючих АЕС досить часто використовувались так звані композитні зварні з'єднання (КЗЗ) різнорідних матеріалів, як правило, сталей феритно-перлітного (бейнітного) і аустенітного класів. Особливість композитних зварних з'єднань полягає в тому, що через різницю в хімічному складі основного і зварювальних матеріалів під час зварювального нагріву може відбуватися значна дифузія хімічних елементів в зоні з'єднання, що викликає хімічну і структурну неоднорідність металу КЗЗ [1, 2], а також за рахунок значної різниці в коефіцієнтах температурного розширення матеріа-

лів складових компонентів у процесі зварювання та післязварювальної термообробки виникають значні нерелаксовані залишкові напруження [3, 4]. Структурна неоднорідність металу КЗЗ та нерелаксовані залишкові напруження помітно впливають на міцність, довговічність та корозійну стійкість елементів обладнання [5]. Значні труднощі з експериментального виміру нерелаксованих залишкових напружень ускладнюють їх облік при визначенні ресурсу елементів обладнання атомних електростанцій.

Починаючи з 2007 р. однією з проблем для діючих атомних енергоблоків водо-водяного енергетичного реактора 440 (ВВЭР-440) є пошкодження КЗЗ Ду-1100 вузла приварки колекторів теплоносія з нержавіючої сталі 08X18N10T до патрубка корпусу парогенераторів (ПГ) із сталі 22К. Кільцеві несущільності (тріщини) були виявлені в зоні сплавлення перлітного і аустенітного металів на

А.А. Макаренко — <https://orcid.org/0000-0002-4713-9726>, О.В. Махненко — <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>

© А.А. Макаренко, О.В. Махненко, 2023

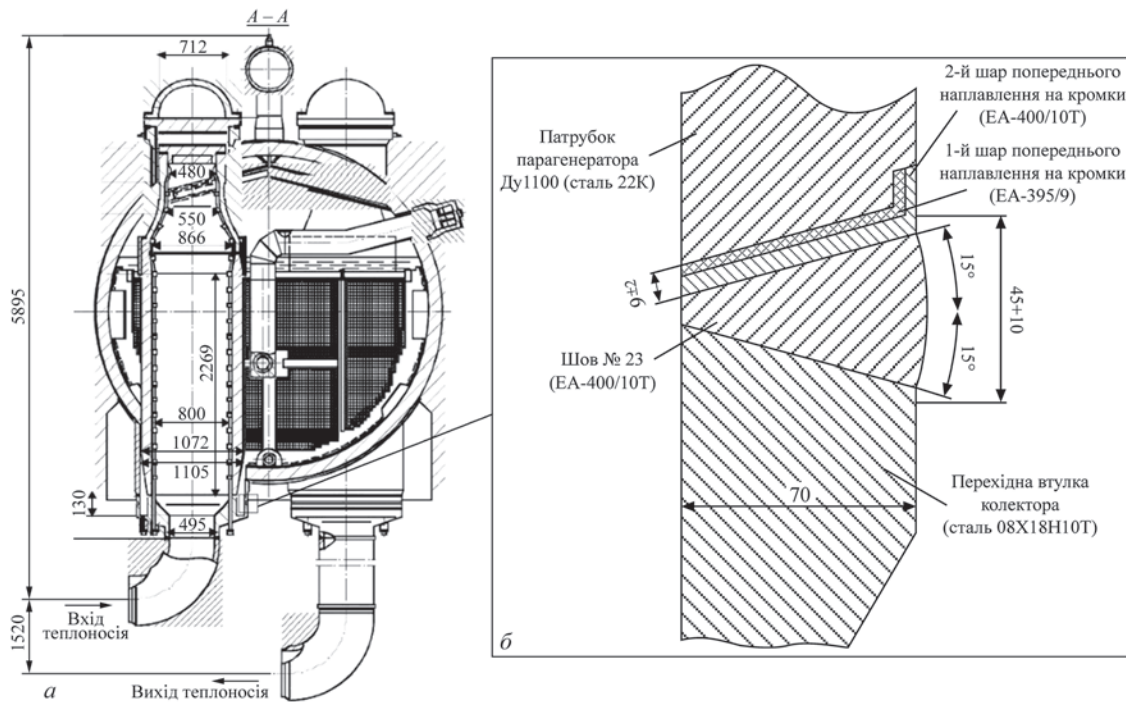


Рис. 1. Конструкція ПГВ-440 з приєднаними колекторами (а) та і схема зварного з'єднання перехідної втулки колектору до патрубку парогенератора (б)

енергоблоках Вірменської АЕС, АЕС Дуковани (Чехія) та деяких інших. Проведені дослідження стосовно характеру та причини виникнення високого рівня пошкоджень [6, 7]. При цьому відсутні систематизовані відомості щодо аналізу залишкових напружень, які утворюються в даному з'єднанні, та їх впливу на ресурс зварного вузла.

Конструкція і технологія КЗЗ корпусу ПГ з колектором. На рис. 1 представлена конструкція зварного з'єднання вузла приварки колектора до патрубку Ду-1100 парогенератора ПГВ-440, яка включає [7–10]:

1. Патрубок парогенератора Ду-1100 зі сталі 22К з попереднім наплавленням на крайку в два шари: перший шар ЕА-395/9 (Св-10Х16Н25АМ6), другий шар ЕА-400/10Т (Св-04Х19Н11М3). Наплавлення проводиться з підігрівом до 100 °С з наступною термообробкою по режиму остаточного відпуску 640 + 20 °С з витримкою 9 год.

2. Перехідну втулку зі сталі 08Х18Н10Т, яка має конусний перехід по зовнішньому діаметру, зі зміною товщини стінки втулки від 70 мм (для приварювання до патрубку корпусу парогенератора) до 35 мм (для приварювання перехідної втулки до циркуляційного трубопроводу).

3. Зварний шов приварки перехідної втулки до патрубку парогенератора зі сталі 22К з попередньо наплавленою крайкою, що виконується ручним електродувим зварюванням електродами ЕА-400/10Т. Зварювання здійснюється без підігріву. Відпуск для зняття залишкових напружень не проводиться.

Пошкоджуваність композитних зварних з'єднань парогенераторів ВВЕР-440. Перше пошкодження в композитних зварних з'єднаннях парогенераторів ВВЕР-440 було виявлено на АЕС [6] у 2007 р. енергоблоку № 3 при експлуатаційному контролі металу парогенератора ЗПГ-1 у зварному з'єднанні № 23х (на виготовлених пізніше ПГ, у тому числі на Рівненській АЕС, зварні з'єднання № 23х і № 23г позначені відповідно № 76 та № 77) методом УЗК виявлено неприпустимі відбивачі. Проведено механічну вирізку темплетів із зварного з'єднання № 23х. При візуальному огляді темплету було виявлено тріщиноподібну несучільність, заповнену продуктами корозії, що проходить по зоні сплавлення перлітної сталі 22 К з наплавленням на крайці шва № 23х. Поверхня темплету з боку сталі 22 К, що стикається з середовищем 2-го контуру, уражена множинною загальною та виразковою корозією глибиною до ~3 мм.

Макроструктури зразків зварних з'єднань наведено на рис. 2. На шліфах виявлені магістральні тріщини, які мають однакове розташування та напрямок — від кореня шва вгору по зоні сплавлення. У зразку перехідне наплавлення, виконане електродом ЕА 395, нерівномірне за товщиною, а значна частина зварного з'єднання відсутня (рис. 2, а).

Аналіз результатів фрактографічного дослідження на зразках зварного з'єднання дозволив відзначити [7]:

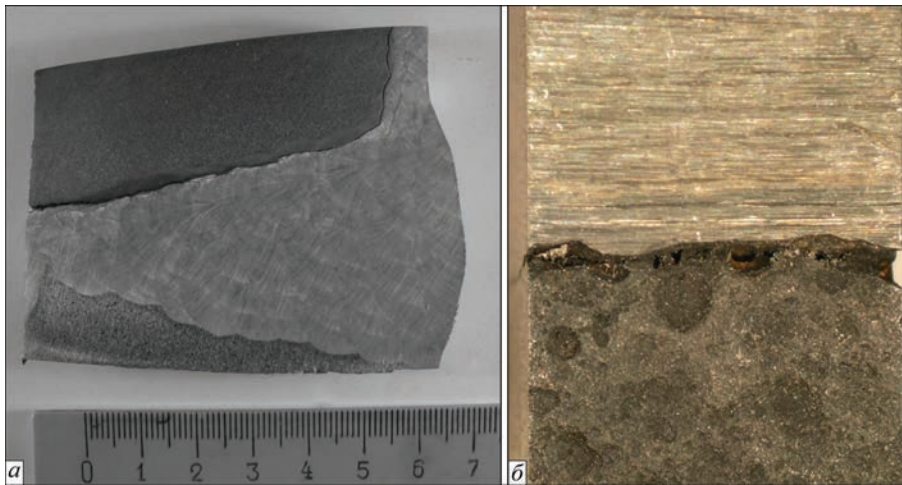


Рис. 2. Макроструктура зразка зварного з'єднання: *a* — вид в поперечному перерізі; *б* — вид на внутрішню поверхню, яка контактує з робочим середовищем 2-го контуру [7]

– зростання магістральної тріщини носить стадійний характер і супроводжується інтенсивним окисленням її поверхні;

– ініціювання тріщини відбувається в зоні лінії сплавлення різнорідних матеріалів композитного зварного з'єднання, що супроводжується інтенсивним розчиненням основного металу з розвитком осередка локальної корозії.

Таким чином, руйнування має переважно корозійно-механічну природу і може бути ідентифіковано як корозійне розтріскування під напруженням, обумовлене певним характером і рівнем напружено-деформованого стану та одночасним впливом корозійного середовища в «кишені» колектора.

Крім того, в окремих мікронах зразка металографічним аналізом чітко визначено наявність зміненого шару, що примикає до основного металу [7]. Цей шар металу є наслідком сильного переміщення металу аустенітного шва та вуглецевої сталі; його хімічний склад має знижений вміст Cr і Ni, що відповідає мартенситній області фазової діаграми Шеффлера. Результати виміру мікротвердості металу зміненого шару і аустенітного металу шва свідчать про більш високу твердість цього шару, що характерно для мартенситу. У структурі шару з підвищеною твердістю виявлено прошарки голчастої мартенситної структури, які могли ініціювати утворення тріщин як відразу після виготовлення, так і в процесі експлуатації.

Мета роботи. В рамках вирішення проблем безпечної експлуатації атомних енергоблоків ВВЕР-440 проведено математичне моделювання теплових процесів, мікроструктурних фазових перетворень і залишкових напружень при зварюванні композитного зварного з'єднання Ду-1100 перехідної втулки колектору теплоносія до патрубку корпусу парогенератора ПГВ-440 для подальшого

аналізу характеру та причини виникнення пошкоджень, що виникають в даному з'єднанні, та їх вплив на ресурс зварного вузла.

Розробка математичної моделі НДС при зварюванні КЗЗ. Для розрахункового прогнозування залишкових напружень в зоні КЗЗ перехідної втулки колектору до патрубка Ду-1100 парогенератора використовувалися методи пружно-в'язко-пластичного аналізу термодформаційних процесів під час виконання наплавлення крайки патрубка парогенератора, проміжної термообробки і заповнення розділки зварного з'єднання багатопрхідним зварюванням. Хоча вважається, що маловуглецева перлітна сталь 22 К не є схильною до утворення загартованих структур під дією зварювальних термічних циклів, тим не менш моделювання мікроструктурних фазових перетворень проводилось для більш детального аналізу цього питання. Для визначення релаксації залишкових напружень після наплавлення крайки проводилось моделювання процесів повзучості під час проміжної термообробки.

Враховуючи частково симетричну конструкцію зварного вузла і можливість ефективного використання допущення швидкорухомого джерела зварювального нагріву для моделювання температурних розподілів та НДС кільцевих зварних з'єднань [11] була побудована 2D скінченно-елементна модель вузла з'єднання перехідної втулки до патрубка Ду-1100 парогенератора при допущенні осьової симетрії останнього (рис. 1). Схема моделі і граничні умови зварного вузла, скінченно-елементна сітка в зоні зварного з'єднання представлені на рис. 3–4.

Температурна задача вирішувалася при допущенні швидкорухомого джерела нагріву, що дозволило використовувати двомірну скінченно-елементну модель в поперечному перерізі зварного

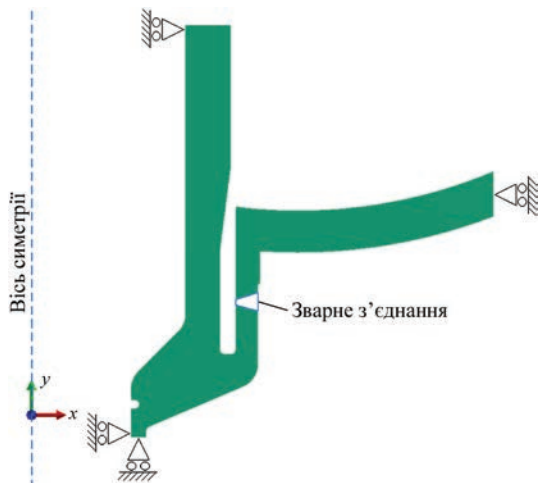


Рис. 3 Схема 2D моделі (обертально-симетрична відносно осі Y) вузла зварного з'єднання і граничні умови

з'єднання (рис. 2). Для моделювання температурних розподілів при виконанні зварювальних проходів застосовувалося рівняння нестационарної теплопровідності, яке включає врахування об'ємного зварювального джерела нагріву $W(x, y, t)$ [11]

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

де ρ — щільність матеріалу; c — питома теплоємність; λ — коефіцієнт теплопровідності; T — температура матеріалу,

$$W(x, y, t) = \frac{6Q}{ab\sqrt{\pi}} \times \exp \left(\frac{-3(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{-3(y-y_0)^2}{b^2} \right), \quad (2)$$

де Q — ефективна потужність зварювального джерела нагріву; x_0, y_0 — координати центру дже-

рела нагріву і a, b — відповідні розміри (ширина і глибина) зони ефективного нагріву в напрямках x, y . Час нагріву металу кожного зварного проходу в поперечному перерізі зварного з'єднання залежить від швидкості зварювання v_w і розміру зони ефективного нагріву a , тобто, в першому наближенні може дорівнювати $t_w = a/v_w$.

Параметри зварювального джерела нагріву обирались таким чином, щоб температура металу в зварному шві перевищувала температуру плавлення, а проміжку часу між проходами було достатньо для охолодження металу до температури супутнього підігріву.

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

$$q = -h(T_{out} - T), \quad (3)$$

де T_{out} — температура довколишнього середовища; q — тепловий потік; h — коефіцієнт теплопередачі з поверхні при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем.

Нестационарний концентрований нагрів викликає появу високих температурних напружень, а також утворення пластичних деформацій в матеріалах зварного з'єднання. З урахуванням гіпотези «плоскої деформації» рішення задачі по визначенню розподілів просторових компонент напружень і деформацій отримано за допомогою двомірної моделі поперечного перерізу зварного з'єднання в пружнопластичній постановці, тобто тензор деформацій може бути представлений у вигляді суми тензорів:

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

де ϵ_{ij}^e — тензор пружних деформацій; ϵ_{ij}^p — тензор пластичних деформацій. Компоненти тензорів

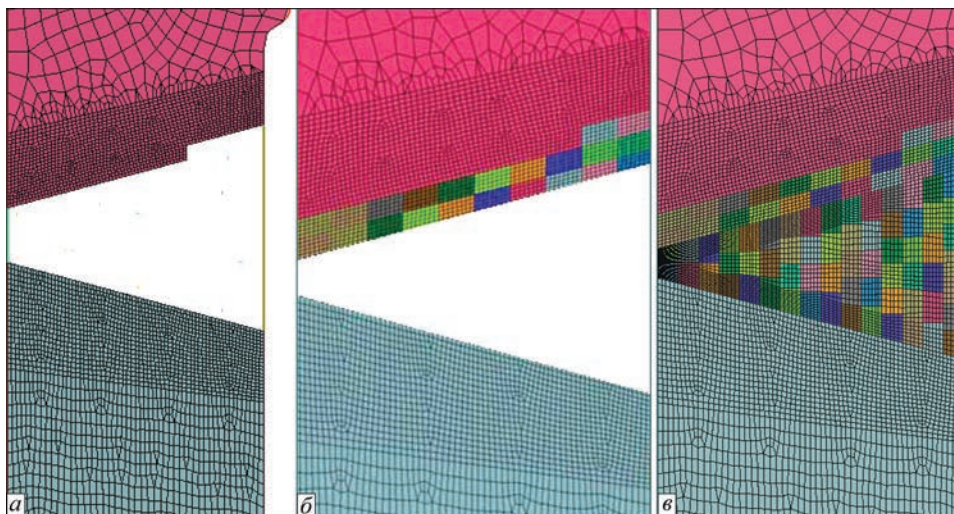


Рис. 4 Скінченно-елементна сітка в зоні зварного з'єднання: а — до наплавлення і зварювання; б — після наплавлення крайки; в — після зварювання

напружень σ_{ij} та пружних деформацій ε_{ij}^e пов'язані один з одним законом Гука:

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

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

модуль зсуву; $K = \frac{1-2\nu}{E}$ — модуль об'ємного

стиснення; E — модуль Юнга; ν — коефіцієнт Пуассона; φ — функція вільних відносних подовжень (об'ємних змін), викликаних зміною температури і мікроструктурними фазовими змінами. В простому випадку, коли структурних перетворень не відбувається:

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

де α — коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу.

При зварюванні сталей, чутливих до термічного циклу зварювання, для даного зварного з'єднання — в перлітній сталі К22 в ЗТВ можуть відбуватися мікроструктурні перетворення з помітними об'ємними змінами, врахування яких впливає на кінетику розподілу зварювальних напружень і деформацій. Сумарний ефект об'ємних змін від температури T_0 до $T(t)$ визначається за [11]:

$$3\varphi = \frac{\sum V_j(T,t)\gamma_j(T) - \sum V_j(T_0)\gamma_j(T_0)}{\sum V_j(T_0)\gamma_j(T_0)}, \quad (7)$$

$(j = m, b, fp, a),$

де $\gamma_j(T)$ — об'єм одиниці маси j -ої фази при температурі T , $V_j(T)$ — частка (в долях від одиниці) j -ої фази при температурі T , індекси m, b, fp, a — відповідно мартенсит, бейніт, ферито-перліт, аустеніт.

Величини $V_j(T)$ для низьколегованих сталей можуть визначатись в залежності від вмісту вуглецю $C, \%$ [12]:

$$\begin{aligned} \gamma_m(T) &= 0,12282 + 8,56 \cdot 10^{-6}T + 2,15 \cdot 10^{-6} C, \text{ (см}^3/\text{г)}; \\ \gamma_a(T) &= 0,12708 + 4,448 \cdot 10^{-6}T + 2,79 \cdot 10^{-6} C, \text{ (см}^3/\text{г)}; \\ \gamma_{b,fp}(T) &= 0,12708 + 5,528 \cdot 10^{-6}T, \text{ (см}^3/\text{г)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Результати розрахунку масової частки кожної фази $V_j(T)$ в кінцевій мікроструктурі після охолодження залежать від швидкості охолодження в характерному інтервалі температур (швидкість охолодження від температури 800 до 500 °C).

Кінетика зміни величини $V_j(T)$ в інтервалі температур від $T_s^{(j)}$ — початок появи j -ої фази до $T_e^{(j)}$ — кінець появи j -ої фази при розпаді аустеніту визначається на основі співвідношень:

$$\begin{aligned} V_j(T) &= V_j^{\max} \left[1 - \exp \left(a_j \frac{T_{sj} - T}{T_{sj} - T_{ej}} \right) \right] \\ a_j &= -2,7 (j = m, fp, b); \\ V_a(T) &= 1 - \sum_{m,fp,b} V_j(T), \end{aligned} \quad (9)$$

де $V_a(T)$ — вміст залишкового аустеніту при температурі T .

Значення температур початку $T_s^{(j)}$ та кінця $T_e^{(j)}$ перетворень j -ої фази, а також її масової частки в кінцевій мікроструктурі після охолодження V_j^{\max} для сталі 22К визначались на основі використання параметричних (регресійних) рівнянь для низьколегованих сталей в залежності від їх хімічного складу та характерного часу охолодження $\Delta t_{8/5}$, с (час охолодження від температури 800 до 500 °C) [12, 13]:

$$\begin{aligned} V_m^{\max} &= 0,5 \left[1 - \operatorname{erf} \frac{\ln \Delta t_{8/5} - \ln \Delta t_m^{50}}{\ln S_m} \right]; \\ V_{fp}^{\max} &= 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \frac{\ln \Delta t_{8/5} - \ln \Delta t_{fp}^{50}}{\ln S_{fp}} \right]; \\ V_b^{\max} &= 1 - V_m^{\max} - V_{fp}^{\max}. \end{aligned} \quad (10)$$

В аустенітній сталі 08X18H10T і зварювальних матеріалах EA-395/9 (Св-10X16H25AM6), EA-400/10T (Св-04X19H11M3) мікроструктурні фазові перетворення не моделюються.

Для аналізу можливого мікроструктурного фазового складу в зоні наплавлення крайок і зварювання патрубку зі сталі 22К була розглянута термкінетична діаграма розпаду аустеніту (рис. 5) для виплавки сталі [14], близької за хімічним складом (C 019 %, Si 0,294 %, Mn 0,67 %, S 0,011 %, P 0,074 %). Видно, що при високих швидкостях охолодження (30 °C/с і вище) металу патрубка під час наплавлення крайок аустенітним матеріалом, або при наступному багатопрхідному зварюванні кільцевого стикового з'єднання утворюється перлітно-бейнітно-мартенситна структура з можливим максимальним вмістом мартенситу приблизно до 30 %.

Пластичні деформації пов'язані з напруженим станом рівнянням теорії пластичної неізотермічної течії, асоційованої з умовою плинності Мізеса:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad (i, j = x, y, z), \quad (11)$$

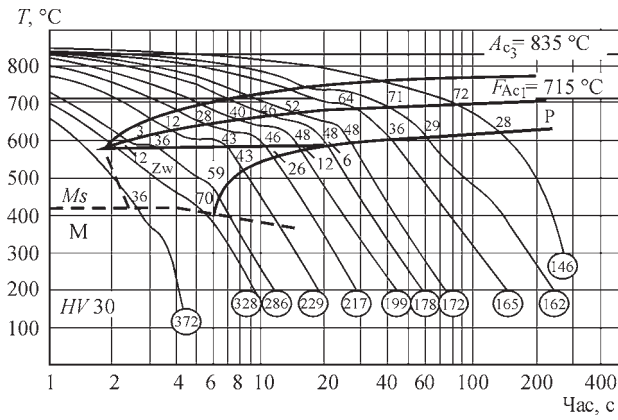


Рис. 5. Термокінетична діаграма розпаду аустеніту для вилиття сталі, близької до сталі 22 К за хімічним складом (C 019 %, Si 0,294 %, Mn 0,67 %, S 0,011 %, P 0,074 %) [14]

де $\partial \epsilon_{ij}^p$ — приріст тензора ϵ_{ij}^p в даний момент часу t , обумовлений історією деформування; напруженнями σ_{ij} та температурою T ; $d\lambda$ — скалярна функція, яка визначається умовами течії в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} d\lambda &= 0, \text{ якщо } f = \sigma_i^2 - \sigma_y^2(T) < 0, \\ &\text{або } f = 0 \text{ при } df < 0; \\ d\lambda &> 0, \text{ якщо } f = 0 \text{ і } df > 0; \\ &\text{стан } f > 0 \text{ неприпустимий,} \end{aligned} \quad (12)$$

де σ_i — інтенсивність напружень

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}$$

$\sigma_y(T)$ — межа плинності матеріалу при температурі T .

Для отримання результатів щодо компонент залишкових напружень σ_{ij} і деформацій ϵ_{ij} необхідно розглядати процес розвитку пружнопластичних деформацій за часом, починаючи з деякого початкового стану. Для цього традиційно використовують метод послідовного простежування, коли для моменту t рішення шукається, якщо відомо повне рішення для моменту $(t - \Delta t)$, де Δt — крок простеження розвитку пружнопластичних деформацій, в межах якого можна приблизно вважати, що розвиток відбувається за досить простою траєкторією навантаження. У цьому випадку зв'язок між кінцевими приростами тензора деформацій $\Delta \epsilon_{ij}$ і тензором напружень σ_{ij} відповідно до [11] можна записати у вигляді:

$$\Delta \epsilon_{ij} = \psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma) - b_{ij}, \quad (13)$$

де ψ — функція стану матеріалу в точці (x, y, z) в момент t .

$$\psi = \frac{1}{2G}, \text{ якщо } f < 0, \psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } f > 0, \text{ стан } f > 0 \text{ є неприпустимим,} \quad (14)$$

b_{ij} — тензорна функція додаткових деформацій, яка визначається збільшенням $\Delta \varphi$ і відомими результатами попереднього етапу простеження:

$$b_{ij} = \left[\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma) \right]_{t-\Delta t} + \delta_{ij}\Delta \varphi \quad (15)$$

$(i, j = x, y, z).$

Умови течії у вигляді (11) включають значну фізичну нелінійність в функції стану матеріалу ψ . Для реалізації такого типу фізичної нелінійності зазвичай використовують ітераційні процеси. В результаті на кожній ітерації фізично нелінійна задача переходить в лінійну задачу типу задачі теорії пружності з перемінним модулем зсуву, який дорівнює $1/2\psi$, і додатковими деформаціями b_{ij} . Для реалізації такої лінеаризованої задачі застосовують чисельні методи.

Фізико-механічні властивості матеріалів.

Для розрахунків температурних полів при зварювальному нагріві використовувалися значення коефіцієнту теплопровідності λ і об'ємної теплоємності (c_p) матеріалів зварного з'єднання в залежності від температури (рис. 6, а, б). Для розрахунку деформаційних процесів використовувалися значення температурного коефіцієнта лінійного розширення α , межі плинності σ_y , модуля пружності E і коефіцієнта Пуассона ν матеріалів також в залежності від температури (рис. 6, в-е). Залежності теплофізичних і механічних властивостей матеріалів від температури отримані згідно довідників [13, 15], а також розрахунком за хімічним складом [16].

Більшість властивостей перлітної сталі 22К (рис. 6, а-г) суттєво відрізняються від властивостей аустенітної жаростійкої сталі 08X18H10T і зварювальних матеріалів EA-395/9 (Св-10X-16H25AM6), EA-400/10T (Св-04X19H11M3). Тільки модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона є близькими за значеннями у всьому температурному діапазоні нагріву (рис. 6 д, е).

Розробка математичної моделі релаксації і перерозподілу залишкових напружень під час термообробки. Згідно з даними паспортів (ПТД) [9, 10] при виконанні композитних зварних з'єднань патрубку парогенератора Ду-1100 з перехідною втулкою колектору після попереднього наплавлення на крайку патрубка зі сталі 22 К в два шари аустенітного матеріалу проводилась термообробка за режимом високого відпуску $640 + 20$ °C протягом 9 год. Після виконання зварювальних проходів з'єднання перехідної втулки до патрубка парогенератора з попередньо наплавленою крайкою відпуск для зняття залишкових напружень не проводився.

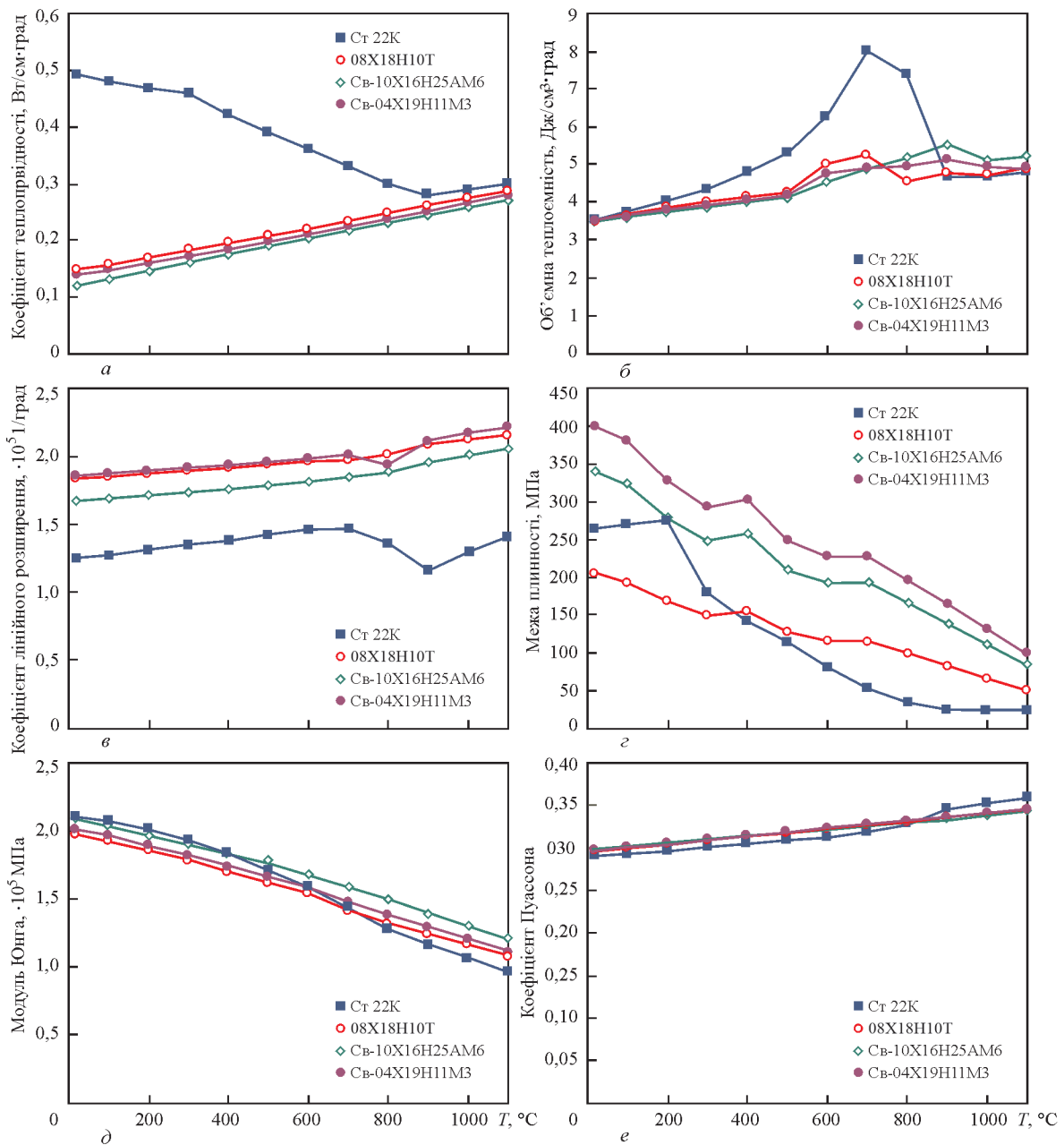


Рис. 6. Механічні та теплофізичні властивості основних матеріалів сталі 22К, сталі 08X18H10T і зварювальних матеріалів EA-395/9 (Св-10X16H25AM6), EA-400/10T (Св-04X19H11M3) в залежності від температури [13–15]: а — коефіцієнт теплопровідності; б — об’ємна теплоємність; в — коефіцієнт лінійного температурного розширення; з — межа плинності; д — модуль Юнга; е — коефіцієнт Пуассона

При проведенні математичного моделювання процесу термообробки після попереднього наплавлення на крайку патрубку визначення нестационарного температурного поля реалізувалося за рахунок конвекційного теплообміну на поверхнях при поступовому нагріванні навколишнього середовища, витримки і подальшого досить повільного охолодження. Нестационарні граничні умови відповідали рівномірному підвищенню температури T_{out} навколишнього середовища зі швидкістю $30\text{ }^\circ\text{C/год}$ в процесі нагрівання до $650\text{ }^\circ\text{C}$, витримці протягом 9 год і зниженню до $20\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $30\text{ }^\circ\text{C/год}$ при охолодженні (рис. 7).

Початкові і граничні умови крайової задачі визначення температурних розподілів в патрубці з наплавленими крайками при термообробці:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0, T_{out}(0) = 20\text{ }^\circ\text{C}, T(0) = 20\text{ }^\circ\text{C}, \\ q = -h(T_{out}(t) - T), \\ (T_{out}(t) = 30\text{ }^\circ\text{C/год} \cdot t, T_{out}^{\max} = 650\text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні патрубка при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем в печі і на повітрі приймався рівним значенню $h = 30\text{ Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$ в умовах природної конвекції і постійним у всьому діапазоні температури нагріву і охолодження. Променистий теплообмін в

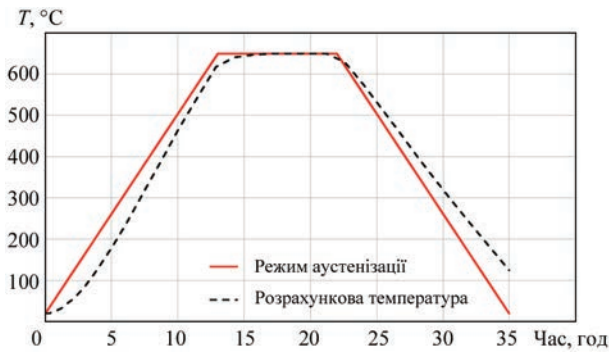


Рис. 7. Графік зміни температури матеріалу патрубку з наплавленими крайками в процесі термообробки

розробленій моделі окремо не моделювався, його вклад враховувався в деякому підвищенні значення коефіцієнту теплопровідності.

Тривалий процес нагріву до температури витримки 650 °C викликає процеси високотемпературної повзучості в матеріалі патрубку і аустенітної наплавки, що призводить до релаксації і перерозподілу залишкових напружень в зоні наплавлення.

У розробленій моделі задача визначення НДС при термообробці вирішувалася у в'язкопружно-пластичній постановці [11]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{cr} \quad (i, j = x, y, z), \quad (16)$$

де швидкість деформацій повзучості визначалася за допомогою закону Бейлі–Нортонa [11]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = A \sigma_{eq}^n. \quad (17)$$

Для сталі перлітного класу 22К при температурі 650°C при визначенні швидкості деформацій температурної повзучості можуть бути прийняті наступні коефіцієнти $A = 1,73 \cdot 10^{-14}$, $n = 5$ [11], а для аустенітних матеріалів наплавлення крайок патрубку ПГ $A = 6,948 \cdot 10^{-14}$, $n = 6,22$ [17].

Результати математичного моделювання температурних розподілів і мікроструктурних фазових перетворень. Результати моделювання мікроструктурних перетворень в металі КЗЗ під час зварювального нагріву ($T_{\text{підігріву}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$) і подальшого охолодження показали (рис. 8) наяв-

ність локального утворення загартованих структур в ЗТВ металу патрубку ПГ (сталь 22К). На рис. 9 представлені графіки зміни в процесі зварювання і подальшого охолодження мікроструктурного фазового стану в характерній точці ЗТВ основного матеріалу ПГ, де отримано максимальний залишковий вміст мартенситу, для різних значень температури підігріву. Застосування при зварюванні КЗЗ попереднього підігріву на рівні $T_{\text{підігріву}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ дозволяє знизити максимальний відносний вміст мартенситу в ЗТВ з 50 до 20 % у порівнянні зі зварюванням без підігріву.

Результати математичного моделювання залишкових напружень після зварювання і після термообробки. На рис. 10 представлені розподіли залишкових напружень після наплавлення крайки патрубку ПГ КЗЗ при температурі попереднього і супутнього підігріву $T_{\text{підігріву}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ і наступного охолодження до $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Радіальна компонента (рис. 10, а) характеризується низьким рівнем напружень і локальними зонами максимальних розтягуючих напружень до 250 МПа в аустенітному матеріалі наплавлення. Осьова (відносно осі патрубку) компонента (рис. 10, б) також характеризується загальним низьким рівнем напружень і локальними зонами максимальних розтягуючих напружень до 300 МПа в основному матеріалі патрубку ПГ, який примикає до аустенітного металу шва на внутрішній і зовнішній поверхнях патрубку. Для кругової компоненти залишкових напружень (рис. 10, в) визначені розтягуючі напруження (до 400 МПа) в зоні основного матеріалу патрубку ПГ, який примикає до аустенітного металу зварного шва.

Після проведення термообробки ($T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{витримки}} = 9 \text{ год}$) рівень залишкових напружень від наплавлення крайок патрубку ПГ значно знижується: максимальні радіальні напруження розтягу до 120 МПа (рис. 11, а), осьові — до 130 МПа (рис. 11, б), кругові — до 190 МПа (рис. 11, в).

Після виконання багатопрохідного зварювання отримані дуже нерівномірні розподіли залиш-

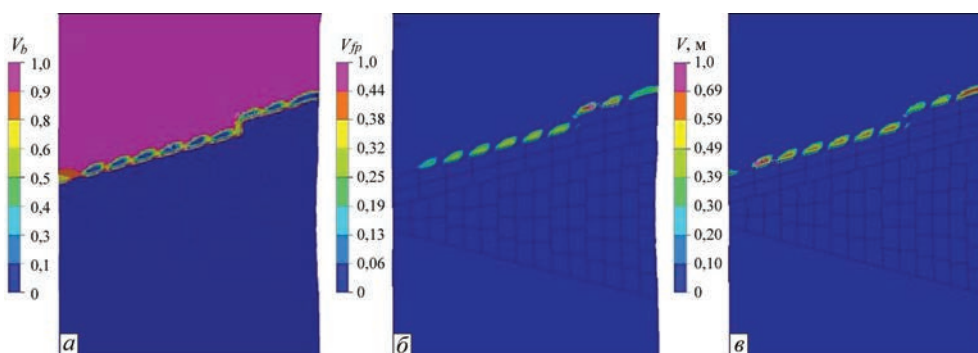


Рис. 8. Результати моделювання залишкового мікроструктурного складу в зоні КЗЗ при $T_{\text{підігріву}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$: а — бейніт; б — фєрито-перлит; в — мартенсит

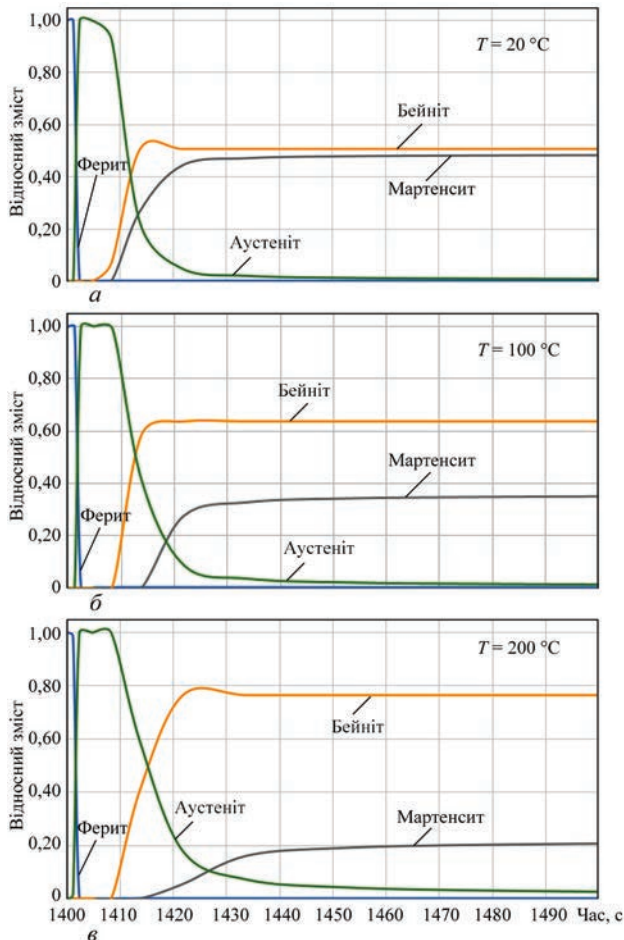


Рис. 9. Кінетика мікроструктурних фазових перетворень в характерній точці ЗТВ основного матеріалу патрубку ПГ (сталь 22К) для різних температур попереднього підігріву: *a* — без підігріву; *b* — $T_{\text{підігріву}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; *v* — $T_{\text{підігріву}} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

кових напружень. Радіальна компонента в зоні зварного з'єднання (рис. 12, *a*) характеризується низьким рівнем напружень і локальними зонами максимальних розтягуючих напружень до 140 МПа в основному матеріалі патрубку ПГ, який примикає до аустенітного металу шва. Осьові залишкові напруження (рис. 12, *б*) мають на внутрішній поверхні з'єднання локальну зону максимальних розтягуючих напружень до 200 МПа на внутрішній поверхні в основному матеріалі патрубку ПГ, який примикає до аустенітного металу шва, і розтягуючі напруження до 400 МПа зовнішній поверхні з'єднання. Найбільш високі розтягуючі напруження (до 450 МПа) визначені для кругової компоненти залишкових напружень (рис. 12, *в*) в зоні основного матеріалу патрубку ПГ, який примикає до аустенітного металу зварного шва, а також в матеріалі зварного шва ближче до зовнішньої поверхні з'єднання.

Таким чином, після моделювання зварювання КЗЗ отримані досить високі залишкові напруження розтягу. Особливо це небезпечно на внутрішній поверхні з'єднання, яка під час експлуатації кон-

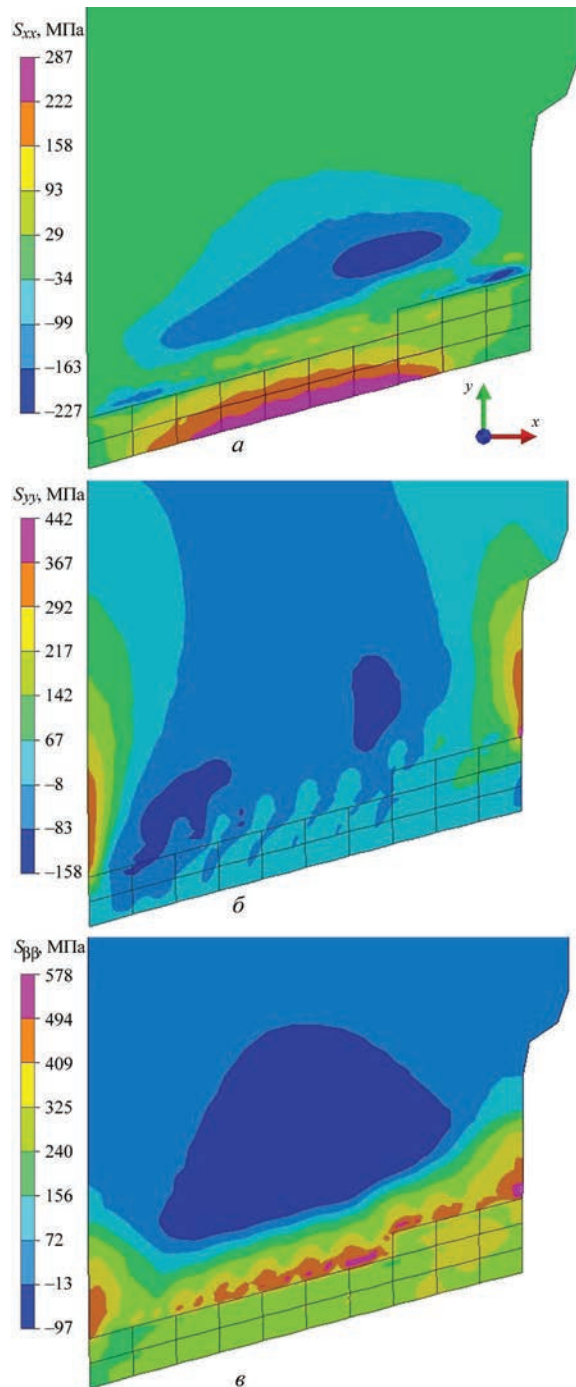


Рис. 10. Залишкові напруження після наплавлення крайки патрубку ПГ: *a* — радіальні σ_{xx} ; *б* — осьові σ_{yy} ; *в* — кругові σ_{zz} такує з корозійною середою теплоносія, а також в зоні примикання (сплавлення) матеріалу патрубку, а саме, сталі перлітного класу до аустенітного металу наплавлення (зварного шва). В цій зоні існує висока вірогідність утворення дефектів несучільності при зварюванні, що може негативно впливати на міцність ПГ при подальшій довгостроковій експлуатації.

Побудовані графіки розподілу залишкових напружень (рис. 14) і експлуатаційних напружень (при нормальних умовах експлуатації (НУЕ), а також сумарних експлуатаційних і залишкових) (рис. 15) в

середньому перерізі (а-а на рис. 13) зварного з'єднання. Вплив залишкових напружень на напружений

стан вузла КЗЗ досить значний, а саме, в зоні наплавлення і примикання (сплавлення) матеріалу перлітної сталі патрубка до аустенітного металу наплавлення відбувається помітне підвищення сумарних напружень у порівнянні з експлуатаційними без врахування залишкових напружень (рис. 15, а, в).

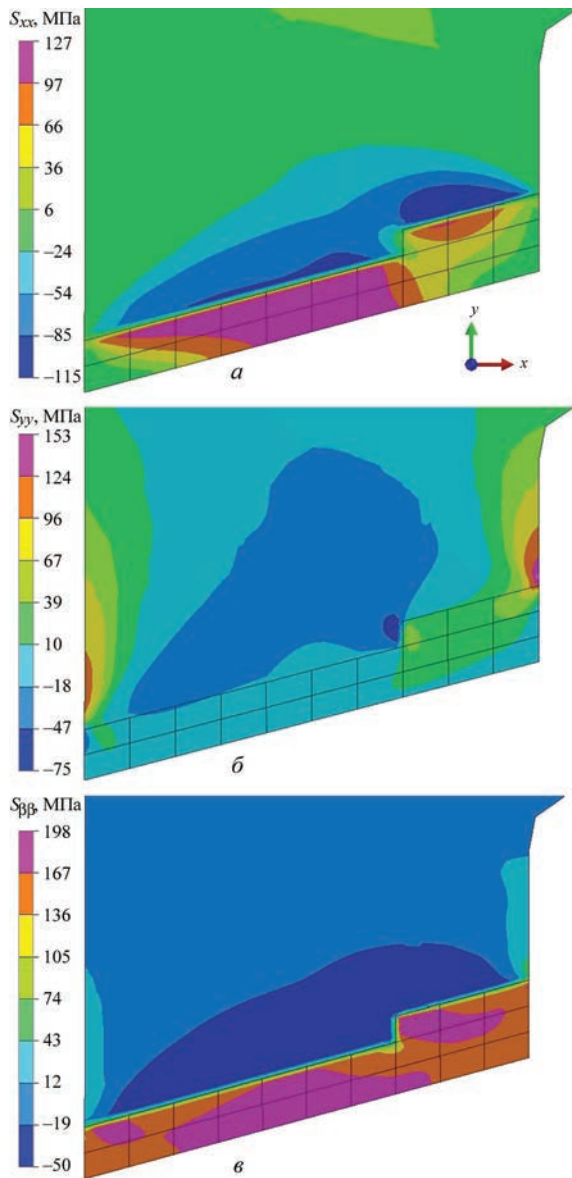


Рис. 11. Залишкові напруження після термообробки крайки патрубка ПГ ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{вигримки}} = 9\text{ год}$): а — радіальні σ_{xx} ; б — осьові σ_{yy} ; в — кругові $\sigma_{\phi\phi}$

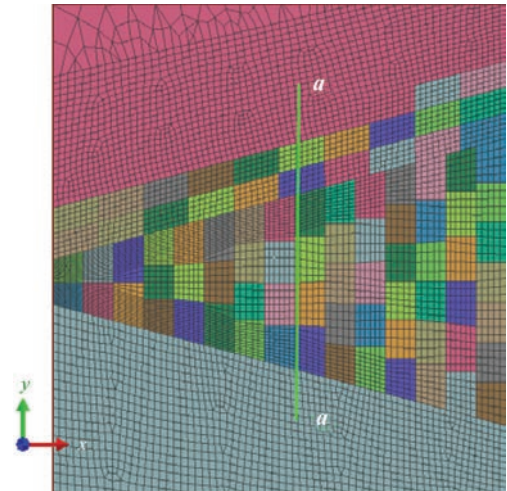


Рис. 13. Переріз зварного з'єднання для визначення характерних розподілів напружень

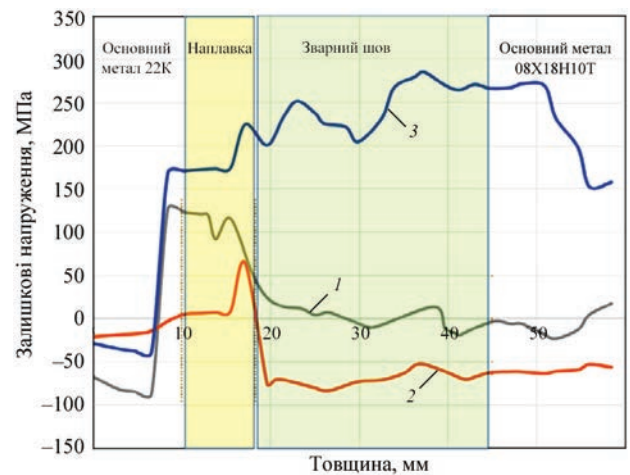


Рис. 14. Розподіли залишкових напружень в середньому перерізі (а-а на рис. 13) зварного з'єднання: 1 — радіальні σ_{xx} ; 2 — осьові σ_{yy} ; 3 — кругові $\sigma_{\phi\phi}$

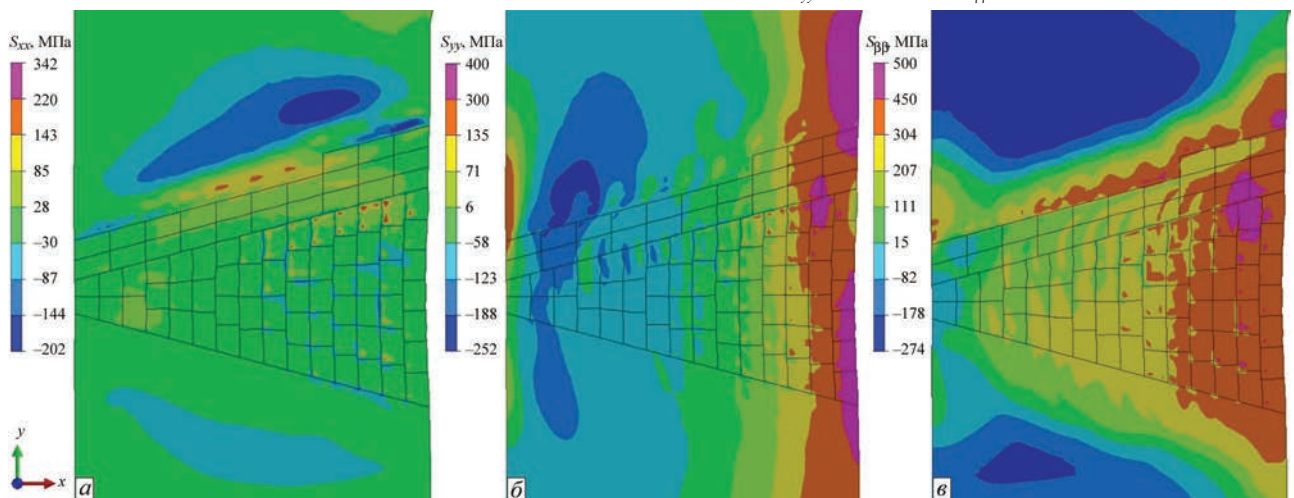


Рис. 12. Залишкові напруження в КЗЗ після зварювання: а — радіальні σ_{xx} ; б — осьові σ_{yy} ; в — кругові $\sigma_{\phi\phi}$

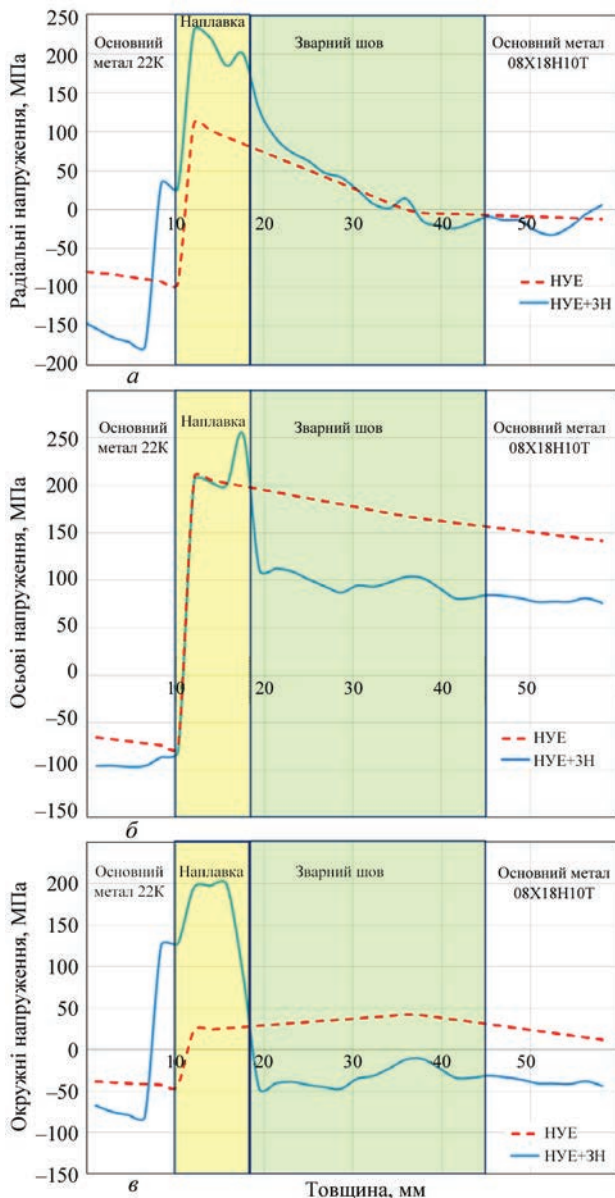


Рис. 15. Розподіли експлуатаційних напружень (експлуатаційних при НУЕ, а також сумарних експлуатаційних і залишкових) в середньому перерізі (а–а на рис. 13) зварного з’єднання: а — радіальні σ_{xx} ; б — осьові σ_{yy} ; в — кругові $\sigma_{\theta\theta}$

Висновки

Аналіз результатів математичного моделювання теплових процесів, мікроструктурних фазових перетворень і НДС в композитному зварному з’єднанні колектору з перехідною втулкою парогенератора ПГВ-440 показав:

при зварюванні без підігріву залишковий вміст загартованих структур в ЗТВ металу патрубку (Ст22К) може досягати 65 %. Застосування попереднього (супутнього) підігріву ($T \geq 200 \text{ }^\circ\text{C}$) дозволяє суттєво знизити відносний вміст мартенситу в основному матеріалі на границі сплавлення з аустенітним матеріалом шва. Але, враховуючи можливі порушення технології наплавлення і зварювання при виготовленні парогенератору, треба

припускати наявність загартованих структур в ЗТВ металу патрубка і зниження характеристик тріщиностійкості матеріалу;

непроведення остаточної термообробки після зварювання призводить до утворення складного характеру розподілу залишкових напружень з високими напруженнями розтягу як в зоні перлітного матеріалу патрубка, так і в зонах аустенітних матеріалів зварного шву і перехідної втулки колектору;

визначені досить високі залишкові напруження розтягу на внутрішній поверхні композитного з’єднання, яка під час експлуатації контактує з корозійною середою теплоносія, а також в зоні сплавлення матеріалу перлітної сталі патрубка до аустенітного металу зварного шва, в якій існує висока вірогідність утворення дефектів несучільності при зварюванні, що може негативно впливати на міцність і структурну цілісність зварного вузла ПГ при подальшій довгостроковій експлуатації.

Список літератури

1. Махненко В.И., Сапрыкина Г.Ю. (2002) Роль математического моделирования в решении проблем сварки разнородных сталей (обзор). *Автоматическая сварка*, **3**, 18–28.
2. Махненко О.В., Козлитина С.С., Дзюбак Л.И. и др. (2010) Риск образования карбидов и σ -фазы при сварке высоколегированных хромоникелевых сталей. *Там же*, **12**, 9–12.
3. Wenchun J., Wanchuck W., Yun L. et al. (2017) Residual Stress Distribution in a Dissimilar Weld Joint by Experimental and Simulation study. *J. of Pressure Vessel Technology*, **139**, 011422-1-011422-10.
4. Deng D., Ogawa K., Kiyoshima S. et al. (2009) Prediction of residual stresses in a dissimilar metal welded pipe with considering cladding, buttering and post weld heat treatment. *Computational Material Sci.*, **47**, 398-408.
5. Касаткин О.Г., Царюк А.К., Скульский В.Ю. и др. (2007) Способ повышения сопротивляемости локальным повреждениям сварных соединений трубопроводов АЭС. *Автоматическая сварка*, **3**, 32–35.
6. Ходаков В.Д., Харина И.Д., Корнеев А.Е. (2008) Исследование характера и причины поврежденной разнородных сварных соединений узла приварки переходного кольца к патрубку Ду1100 Нововоронежской и Кольской АЭС. *Сб. тр. 10-й Межд. конф., СПб., октябрь 2008*. Т. 2. СПб, Прометей.
7. Вardanян А.М. (2017) *Оценка влияния условий эксплуатации на остаточный ресурс узлов парогенераторов энергоблоков ВВЕР-440*: афтореф. дис. ... канд. техн. наук. Ереван, НПУА.
8. *Парогенератор ПГВ-213*: Инструкция по эксплуатации У 213-И-553.
9. *Корпус парогенератора*: Паспорт. 1137.50.06.000 ПС.
10. *Корпус парогенератора*. Паспорт. 1137.50.07.000 ПС.
11. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
12. Касаткин О.Г., Зайффарт П. (2002) Расчетные модели для оценки механических свойств металла ЗТВ при сварке низколегированных сталей. *Сб. тр. Междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*, г. Киев, сс. 103–106.
13. Зубченко А.С. (2003) (ред.) *Марочник сталей и сплавов*. Москва, Машиностроение.

14. Seyfarth, Meyer, Scharf (1992) Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder *Fachbuchreihe Schweißtechnik*, 110. Düsseldorf, DVS Verlag.
15. (2003) *Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии*. Лебедев А.А. (ред.). Киев, Изд. дом «Ин Юре».
16. Saunders N., Guo U.K., Li X. et al. (2003). Using JMatPro to model materials properties and behavior. *JOM*, **55**, 60–65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0013-2>
17. Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P. et al. (2006). Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Pt 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, **38(5)**, 449–457.

References

1. Makhnenko, V.I., Saprykina, G.Yu. (2002) Role of mathematical modeling in solving problems of welding dissimilar steels (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 14-25.
2. Makhnenko, V.I., Kozlitina, S.S., Dzyubak, L.I. et al. (2010) Risk of formation of carbides and α -phase in welding of high-alloy chrome-nickel steels. *The Paton Welding J.*, **12**, 5-8.
3. Wenchun, J., Wanchuck, W., Yun, L. et al. (2017) Residual stress distribution in a dissimilar weld joint by experimental and simulation study. *J. of Pressure Vessel Technology*, **139**, 011422-1-011422-10.
4. Deng, D., Ogawa, K., Kiyoshima, S. et al. (2009) Prediction of residual stresses in a dissimilar metal welded pipe with considering cladding, buttering and post weld heat treatment. *Computational Material Sci.*, **47**, 398-408.
5. Kasatkin, O.G., Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu. et al. (2007) Method for improving local damage resistance of welded joints in NPP pipelines. *The Paton Welding J.*, **3**, 27-30.
6. Khodakov, V.D., Kharina, I.D., Korneev, A.E. (2008) Examination of nature and damage causes of dissimilar welded joints in welding of transition ring to branch pipe Du1100 assembly at Novovoronezhsky and Kolsky NPP. In: *Proc. of 10th Int. Conf. (St.-Petersburg, October 2008)*. Vol. 2, St.-Petersburg, Prometej.
7. Vardanyan, A.M. ((2017) *Evaluation of influence of service conditions on residual life of assemblies of steam generators of power units WWER-440*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Erevan, NPUA [in Russian].
8. Steam generator PGV-213: Operating manual U 213-I-553 [in Russian].
9. *Steam generator body: Certificate*. 1137.50.06.000 PS [in Russian].
10. *Steam generator body: Certificate*. 1137.50.07.000 PS [in Russian].
11. Makhnenko, V.I. (2006) *Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
12. Kasatkin, O.G., Seyfarth, P. (2002) Calculation models for evaluation of mechanical properties of HAZ metal in welding of low-alloyed steels. In: *Proc. of Int. Conf. on Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes*. Kyiv, 103-106.
13. (2003) *Steel and alloy grades*. Ed. by A.S. Zubchenko. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
14. Seyfarth, Meyer, Scharf (1992) Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder *Fachbuchreihe Schweißtechnik*, 110. Düsseldorf, DVS Verlag.
15. (2003) *Mechanical properties of structural materials in complex stress state*. Ed. by A.A. Lebedev. Kyiv, In Yure [in Russian].
16. Saunders, N., Guo, U.K., Li, X. et al. (2003). Using JMatPro to model materials properties and behavior. *JOM*, **55**, 60-65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0013-2>
17. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Kursevich, I.P. et al. (2006). Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Pt 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, **38(5)**, 449-457.

MATHEMATICAL MODELING OF RESIDUAL STRESSES IN A COMPOSITE WELDED JOINT OF THE COLLECTOR ADAPTER SLEEVE TO THE BRANCH PIPE OF ZPM-440 STEAM GENERATOR

A.A.Makarenko¹, O.V.Makhnenko²

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

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Composite welded joints of dissimilar materials, usually steel of ferrite-pearlite (bainite) and austenite classes were used in elements of equipment and pipelines of operating nuclear power plants (NPP). The considerable difference in chemical composition of base material and welding consumables leads to chemical and structural inhomogeneity of metal in the joint zone, and the difference in the coefficients of thermal expansion of the materials during welding and postweld heat treatment results in formation of high unrelaxed residual stresses, which significantly influence the strength, fatigue life and corrosion resistance of equipment elements. Considerable difficulties of experimental measurement of residual stresses make it complicated to take them into account at determination of the service life of nuclear power plant elements. Damage of the Dn-1100 welded joint in the welded assembly of the coolant collector adapter sleeve from 08Kh18N10T stainless steel and the branch pipe of the steam generator body from 22K steel is one of the problems in safe operation of WWER-440 nuclear power units. In this connection, the methods of mathematical modeling were used to perform analysis of the microstructural phase composition and residual stresses, arising in this joint in welding, and of their influence on the service life of the welded assembly. Analysis of the results of mathematical modeling of the thermal processes, microstructural phase transformations and stress-strain state (SSS) in the composite welded joint showed that hardened structures in the HAZ of branch pipe metal (St22K) and lowering of the material crack resistance characteristics can be found at violation of surfacing and welding technology during steam generator manufacture, namely non-compliance with the conditions of preheating and concurrent heating ($T \geq 200$ °C). Rather high residual tensile stresses were determined on the composite joint inner surface, which is in contact with the coolant corrosive medium in operation, as well as in the zone of contact (fusion) of the material of branch pipe pearlitic steel to austenitic metal of the weld, where there is a high probability of discontinuity defect formation in welding. It may have a negative influence on the strength and structural integrity of the welded assembly of branch pipe of steam generator (SG) at further long-term service. 17 Ref., 15 Fig.

Keywords: composite welded joint, PGV-440 steam generator, heat-affected zone, microstructural phase transformations, residual stresses, mathematical modeling

Надійшла до редакції 08.03.2023

ГІГІЄНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ СТВОРЕННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

О.Г. Левченко¹, Ю.О. Полукаров¹, О.М. Гончарова², О.М. Безушко²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: levchenko.opcb@ukr.net

²ІЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: goncharova.olga789@gmail.com

Визначено рівні та спектральний склад магнітних полів, що створюються обладнанням контактної зварювання різними способами, з метою оцінювання їх впливу на організм зварників. Аналіз літературних джерел щодо контактної зварювання засвідчив про майже повну відсутність інформації щодо електромагнітної безпеки зазначених способів зварювання. Наведено запропоновані методичні підходи до визначення рівнів магнітних полів, засобів їх вимірювань та методів оцінки їх впливу на організм зварника. На основі аналізу і обробки отриманих осцилограм та спектрограм магнітних полів виконано вимірювання їх частотних і кількісних характеристик. Для визначення загального рівня полічастотного магнітного поля, що виникає при контактному зварюванні, використано запропонований узагальнений показник рівня магнітного поля. Встановлено, що при контактному стиковому і конденсаторному точковому зварюванні перевищення допустимого рівня магнітного поля обумовлене формою зварювального струму та наявністю в їх спектрі потужних гармонічних сигналів у частотних діапазонах 50...1000 і 1000...10000 Гц. Показано, що спектральний склад та величина сигналу магнітного поля визначається, переважно, самим способом зварювання та вихідними параметрами джерел живлення. Показано, що контактне стикове та конденсаторне точкове зварювання можливе за умови його виконання стаціонарним способом з розміщення робочого місця (пульта керування) на певній відстані від зварювальних електродів. На відміну від цих способів з'єднання металів, контактне стикове зварювання оплавленням не становить небезпеки для зварників, проте при ручному зварюванні електродний кабель не повинен обвиватися навколо тіла зварника. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: контактне зварювання, магнітне поле, частота, напруженість, норматив, показники, рекомендації

Вступ. Серед відомих способів зварювання плавленням електричне контактне зварювання займає значне місце. Застосування цього способу з'єднання металів, відносна простота, відсутність будь-яких вимог до початкового стану зварювальних поверхонь дає можливість вирішувати багато складних технічних задач у різних галузях промисловості та будівництва. Цей технологічний процес можна використовувати для зварювання всіх металів і сплавів, які застосовуються в сучасній техніці. Проте, як показала практика, експлуатація електричного обладнання супроводжується генеруванням підвищених рівнів електромагнітних випромінювань, шкідливих, і, в певних випадках, небезпечних для організму людини [1, 2]. Тому питання електромагнітної безпеки виробничого обладнання, дії електромагнітних полів на організм людини, а також створення відповідних заходів та засобів захисту від них є актуальними [3, 4]. У залежності від способу зварювання, виду обладнання та відстані до нього зварника рівні магнітної складової електромагнітного поля, тобто напруженість магнітних полів (МП) може перевищувати гранично допустимі рівні. Такі МП можуть бути небезпечними для організму людини: можуть ви-

кликати захворювання центральної нервової та серцево-судинної систем, руйнують клітини тканини людини, мають канцерогенну дію тощо.

Тому на даний час виникла нагальна необхідність у проведенні досліджень рівнів МП при використанні зварювального обладнання різних видів з метою їх гігієнічної оцінки та розробки методів і засобів захисту зварників.

У сучасних дослідженнях щодо контактної зварювання, зазвичай, мова йде про оснащення зварювального обладнання спеціальними додатковими приладами для отримання поглиблених знань про процес і якість зварного шва [5]. Є роботи, що стосуються зварювання металів різних видів методом контактної стикової зварювання шляхом перемішування розплавлених металів [6], удосконалення техніки зварювання [7] та поліпшення якості зварних з'єднань [8]. Характерною особливістю сучасних досліджень є використання для контактної зварювання магнітної підтримки, тобто дії МП на створений зварний шов з метою поліпшення його якості [9]. При цьому викликає здивування те, що не зачіпаються важливі питання шкідливої дії МП, яке індукується під час зварювання, на організм оператора-зварника.

Левченко О.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-9737-7212>, Полукаров Ю.О. – <https://orcid.org/0000-0002-6261-3991>, Гончарова О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-5213-6300>, Безушко О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-6148-1675>

© О.Г. Левченко, Ю.О. Полукаров, О.М. Гончарова, О.М. Безушко, 2023

Є деякі вітчизняні публікації щодо дугового зварювання [10] і контактного [11, 12], які свідчать, що при експлуатації обладнання для контактного зварювання рівні МП значно вищі, ніж при дуговому.

У роботі [11], яка стосується контактної точкової зварювання, було встановлено значне перевищення рівня МП у широкому діапазоні частот і показано як його рівень знижується зі збільшенням відстані від зварювальних електродів.

Таким чином, аналіз цих малочисельних літературних джерел про дослідження МП, що створюються обладнанням контактної зварювання, свідчить про те, що ці питання залишаються не вирішеними і до цього часу.

Враховуючи вищезазначене, виникла необхідність у проведенні нових досліджень рівнів МП при використанні існуючого зварювального обладнання з метою їх гігієнічної оцінки та розробки методів і засобів захисту зварників.

Метою дослідження є визначення закономірностей створення МП при різних способах контактної зварювання для їх гігієнічної оцінки у відповідності з нормативами.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити показники рівнів МП (напруженість в установлених діапазонах частот, загальний рівень МП та допустимий час роботи зварника при застосуванні різних способів контактної зварювання);

- дати гігієнічну оцінку МП у відповідності з новими нормативами для подальшого розроблення рекомендацій із захисту зварників від МП.

Методика досліджень. Гігієнічне оцінювання рівня МП полягає у вимірюванні напруженості МП і його порівняння з сучасними санітарними нормами [13].

Оцінка параметрів МП на робочому місці зварників виконувалась в такій послідовності:

- визначення зони можливого знаходження працюючого біля електричного обладнання під час проходження зварювального струму;

- виділення в цій зоні точок максимально наближених до джерела магнітного поля;

- визначення частотних діапазонів випромінювань і вимірювання напруженості магнітного поля в цих точках і діапазонах;

- визначення допустимого часу роботи зварника.

Для вимірювання напруженості МП використовували виносний датчик (перетворювач магнітного поля), інтегруючий RC-ланцюг і реєструючий пристрій, в якості якого використовували цифровий запам'ятовуючий осцилограф з функцією швидкого перетворення Фур'є з блоком розширення. Застосовували такі прилади:

- датчик МП ДМП-1 (Україна);
- вимірювач індукції МП ГФІ-1 (Україна);
- вимірювач індукції МП ТП2-2У-01 (Україна);
- осцилограф PCS-500 з ПК (Velleman, Бельгія);

- осцилограф цифровий запам'ятовуючий ТДС 1002 (Tektronix, США).

Вимірювання рівнів МП виконувалось у всіх чутливих точках організму людини, які можуть піддаватись небезпечній та шкідливій дії МП. До них, переважно, належать такі точки: головний мозок, серце й легені (груди), сечостатеві органи (живіт), кисті рук. Оскільки електричний кабель може дотикатись до тіла зварника, на ньому також необхідно визначати напруженість МП [12].

У процесі вимірювань напруженості МП датчик вносили в поле, що досліджувалось, і орієнтували в просторі по максимуму показів реєструючого приладу. Виконували три виміри у вигляді коротких імпульсів з великим періодом тривалості. При цьому датчик розташовували поспідовно у трьох взаємно перпендикулярних площинах і реєстрували його показання в кожній площині. Амплітудне значення вектора напруженості МП визначали за формулою [13]:

$$H_m = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}, \quad (1)$$

де H_x, H_y, H_z – значення напруженості МП у кожній площині.

Сумарне значення напруженості магнітного поля H визначали за виразом [13]:

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}, \quad (2)$$

де H_n – напруженість магнітного поля окремої гармоніки.

Для об'єктивної оцінки загального енергетичного навантаження МП на організм людини необхідно врахувати всі гармонічні складові МП. Тому для діапазону частот ≤ 300 МГц, в яких працюють джерела МП і для яких встановлено різні гранично допустимі рівні (ГДР), необхідно дотримуватись наступних вимог [13]:

$$\frac{H_1^2}{H_{ГД1}^2} + \frac{H_2^2}{H_{ГД2}^2} + \dots + \frac{H_n^2}{H_{ГДn}^2} \leq 1, \quad (3)$$

де H_1, H_2, H_n – фактична напруженість МП у різних діапазонах частот, А/м; $H_{ГД1}, H_{ГД2}, H_{ГДn}$ – ГДР МП у відповідних діапазонах частот, А/м.

Це ж саме стосується і гармонічних складових МП одного джерела випромінювань. Тому, позначивши суму співвідношень виразу (3) як MFI (magnetic field indicator) [12], його можна представити в наступному вигляді:

$$MFI = \sum \frac{H_n^2}{H_{ГДn}^2} \leq 1 \quad (4)$$

Якщо даний показник перевищує одиницю, то він показує у скільки разів рівень МП перевищує нормативне значення енергетичного навантаження МП на організм зварника. Отже, це співвідношення є не що інше як узагальнений показник рівня магнітного поля MFI [12].

Таким чином, якщо $MFI > 1$, на робочих місцях повинні застосовуватися відповідні заходи захисту операторів контактної зварювання, які б забезпечували безпечні умови праці протягом восьмигодинної робочої зміни. Також, згідно установленому нормативу [13] можна застосовувати захист часом, тобто допустимий час роботи зварника ($T_{зв.доп}$) можна зменшувати у відповідності з величиною MFI

$$T_{зв.доп} = \frac{8}{MFI}, \text{ годин.} \quad (5)$$

Результати експериментів та їх аналіз. Досліди проводились у зварювальних лабораторіях Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона на типових робочих місцях. Виконували вимірювання напруженості МП при застосуванні наступних способів контактної зварювання: контактної стикового безперервним та пульсуючим оплавленням, дугового стикового, конденсаторного точкового.

У табл. 1–3 наведено результати вимірювань і розрахунку показника рівня МП MFI для кожного способу, режиму зварювання та частотного діапазону згідно вимог санітарних норм [13]. Разом з тим, застосування такого показника як допустимий час впливу МП на зварника ($T_{зв.доп}$) дає можливість найбільш зручно для розумового сприйняття оцінювати рівень МП та його вплив на організм людини.

Таблиця 1. Результати визначення рівнів магнітного поля при контактному стиковому зварюванні безперервним і пульсуючим оплавленням

Зварювальне обладнання, способи зварювання, виріб	Характеристики зварювального процесу		Зона вимірювання МП	Діапазон частот, Гц	MFI	$T_{зв.доп}$, години
	Тривалість процесу, с	Вид зварювального струму				
Стационарна машина для зварювання рейок К-1000, зварювання безперервним оплавленням	180,0	Змінний, 50 Гц, з амплітудною модуляцією	Зварювальний трансформатор розташований в машині на рівні живота. Відстань від корпусу машини: 0,25 м	5...50	<<1	6,6
				50...100	1,2	
			0,5 м (робоча зона)	5...50	<<1	8,0
				50...100	0,08	
Стационарна машина для зварювання рейок К-1000, зварювання пульсуючим оплавленням	Тривалість усього циклу 90: 30 – безперервним оплавленням (підігрів)	Змінний, 50 Гц	Зварювальний трансформатор та пульт керування машиною розташований на рівні живота. Відстань від машини: 0,25 м	5...50	<1	0,1
				50...100	85,0	
	60 – пульсуюче оплавлення (зварювання)	Змінний, 50 Гц, з амплітудною модуляцією	0,5 м (робоча зона)	5...50	<1	0,85
				50...100	9,23	
	1,0 м (робоча зона)	5...50	<<1	6,0		
			50...100		1,33	
	1,5 м (робоча зона)	5...50	<<1	>8,0		
			50...100		<1	

Таблиця 2. Результати визначення напруженості магнітного поля при контактному дуговому стиковому зварюванні

Марка обладнання, спосіб зварювання, вид струму	Режим зварювання (час циклу, с)	Діапазон частот, Гц	Напруженість МП, А/м	Показник рівня МП MFI	Допустимий час роботи зварника, години (хвилини)	Зона вимірювань МП
Пістолет для приварки шпильок «ELOTOP-502» фірми «Koster», дуго-стикове, постійний імпульсний струм	0,28 (імпульс постійного струму), джерело струму – трифазний трансформатор з тиристорним випрямлячем і електронним блоком керування	0...5	90...192	0,004	≈ 8	Ноги, кисті рук
		5...50	18...129	0,032		
		50...1000	8...81	1,01		

Таблиця 3. Результати визначення напруженості магнітного поля при контактному конденсаторному зварюванні

Марка обладнання, спосіб зварювання, вид струму	Режим зварювання (час циклу)	Діапазон частот, Гц	Напруженість МП, А/м	Показник рівня МП MFI	Допустимий час роботи зварника, години (хвилини)	Зона вимірювань МП
МТК-2201, стационарна машина для точкового конденсаторного зварювання, постійний струм	Напряга – 700 В, час циклу зварювання – 10 мс	50...1000	6...50	0,002	0,6 (36)	Груди
		1000...10000	8...34	0,54		
		50...1000	30...201	0,005		Ноги, кисті рук
		1000...10000	8...112	14,1		

Розглянемо отримані результати для кожного способу контактного зварювання.

Контактне стикове зварювання безперервним та пульсуючим оплавленням виконували в робочій зоні оператора (хоча в промисловості оператор, як правило, повинен знаходитися на відстані 5 м від зварного стику). Виконували зварювання залізничних рейок Р65 на змінному струмі частотою 50 Гц. Визначення рівнів МП здійснювали на різній відстані від машини.

Спочатку аналізували отримані осцилограми (рис. 1) та спектрограми (рис. 2) МП, вимірювали показники їх рівнів і зводили в табл. 1.

Результати досліджень дали можливість виявити наступні характерні закономірності.

Для цього способу зварювання характерно, що на оптимальній швидкості оплавлення металу в кожному напівперіоді змінного струму має бути більша кількість рідких перемичок розплавленого металу між торцями зварюваних деталей, необхідних для утворення зварного з'єднання. Руйнування цих перемичок характеризується відповідними кидками (змінami) струму та напруги. Зазвичай, при стійкому процесі оплавлення відбувається чотири-сім таких кидків (тобто з основними гармоніками 400...800 Гц), які значно перевищують напругу холостого ходу зварювального трансформатора. Це і призводить до виникнення підвищеного рівня МП.

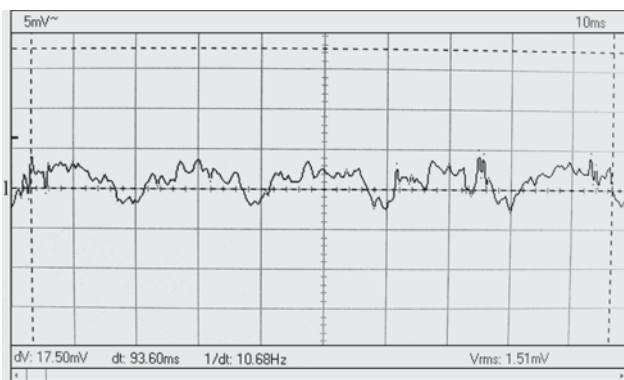


Рис. 1. Осцилограма магнітного поля контактної стикової зварювання безперервним оплавленням (умови вимірювання наведено в табл. 1)

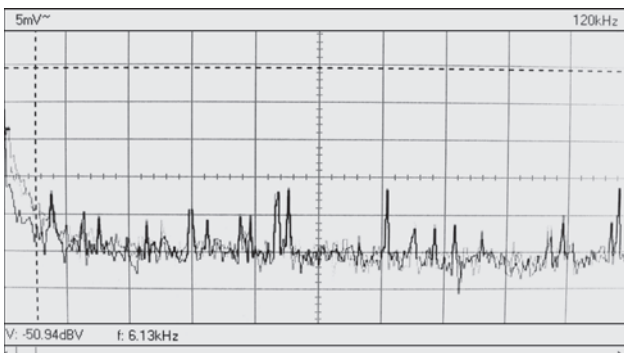


Рис. 2. Спектрограма магнітного поля контактної стикової зварювання безперервним оплавленням

Отримано наступні результати вимірювань рівнів МП у різних точках робочої зони зварника в різних діапазонах частот. У ділянці живота зварника на відстані 0,25 і 0,5 м MFI відповідно становить 1,2 і 0,08, а $T_{зв.доп}$ збільшується з 6,6 до 8 год. Тобто, на цій відстані стає можливим тривалість роботи зварника протягом 8 годин.

Процес контактної стикової зварювання пульсуючим оплавленням рейок Р65 (табл. 1) складався з двох етапів:

- підігрівання торців рейок безперервним оплавленням протягом 30 с;
- зварювання пульсуючим оплавленням протягом 60 с.

Гігієнічні показники всього процесу визначались саме другим етапом зварювання (60 с) – пульсуючим оплавленням.

В умовах проведення експериментів, наведених в табл. 1, отримано такі результати вимірювання рівнів МП. У ділянці живота на відстані від машини:

- на відстані 0,5 м від машини (робоча зона):
 $MFI \ll 1$ – діапазон частот 5...50 Гц;
 $MFI = 9,23$ – діапазон частот 50...1000 Гц, $T_{зв.доп} \approx 0,85$ год (50 хв);
- на відстані 1,0 м від машини (робоча зона):
 $MFI \ll 1$ – діапазон частот 5...50 Гц;
 $MFI = 1,4$ – діапазон частот 50...1000 Гц, $T_{зв.доп} \approx 5,7$ год;
- на відстані 1,5 м від машини (робоча зона):
 $MFI \ll 1$ – діапазон частот 5...50 Гц;
 $MFI < 1$ – діапазон частот 50...1000 Гц, $T_{зв.доп} = 8$ год.

Таким чином, мінімальний допустимий час, який визначає тривалість роботи зварника, відноситься до частотного діапазону 50...1000 Гц і становить 0,85 год (50 хв).

Враховуючи, що гігієнічні вимоги до рівня напруженості МП у даному випадку визначаються тільки другим етапом процесу (пульсуючим оплавленням), загальний допустимий час зварювання (з урахуванням безпечного першого етапу) складає $T_{зв.доп} = \frac{90}{60} \cdot T_{зв.доп(0,25)} = 1,275$ год.

Якщо ж робочою зоною вважати, наприклад, відстань від машини 0,25 м (див табл. 1), $T_{зв.доп} = \frac{90}{60} \cdot T_{зв.доп(0,25)} = 1,154$ год. Це дає можливість зварювати всього 6 стиків за робочу зміну.

Результати виконаних досліджень показали, що в даному випадку визначальним санітарно-гігієнічним фактором є магнітне випромінювання в діапазоні частот 50...1000 Гц, а не 1000...10000 Гц. Ці закономірності, в загальному, відносяться також до процесу стикової зварювання пульсуючим оплавленням. Спектри МП, що створюють-

ся під час стикового зварювання пульсуючим оплавленням з амплітудною модуляцією зварювального струму, відрізняються від дискретних спектрів МП процесів безперервного оплавлення перехідним характером і великою інтенсивністю спектральних складових (на однакових відстанях від джерела МП), а також наявністю окрім основних гармонік, додаткових сигналів модулюючої частоти. При зварюванні рейок амплітуди основних гармонік приблизно на 6 дБ менші від амплітуд основних гармонік, що відповідає коефіцієнту модуляції 100 % і складає приблизно половину їх величини. Це суттєво збільшує нормовані параметри при розрахунку енергетичного балансу спектра МП та погіршує гігієнічні показники процесу. Разом з тим ускладнюється методика вимірювання, приладна база і працездатність обробки результатів, але значно підвищується вірогідність оцінки спектра за рахунок значної стабілізації зварювального процесу (його системності, наближення до локально-стаціонарної моделі) та повторюваності спектрів (як і якості зварювання).

Встановлено, що осцилограми і спектри МП одних і тих же процесів стикового зварювання на різних зварювальних машинах можуть суттєво відрізнятися. Це пояснюється їх конструктивними особливостями та індуктивністю зварювальних трансформаторів, розмірами й просторовим розміщенням зварювальних (силових) контурів, конфігурацією зварюваних деталей, роботою приводних гідравлічних пристроїв тощо. При цьому найбільш небезпечні для зварників МП, гармоніки яких знаходяться в межах діапазону від 50 до 1000 Гц.

Дослідження МП, що виникає при дуговому стиковому зварюванні ручним способом, виконувалось пістолетом «ELOTOP» фірми «KOSTER» (Німеччина). Виконувалось приварювання шпильок діаметром 3...6 мм до металевих листів імпульсним постійним струмом. У якості джерела струму використовували випрямляч електричного струму без фазового керування тиристорами.

У цьому випадку маємо зовсім іншу характеристику МП (табл. 2) у порівнянні з попереднім способом контактного стикового зварювання безперервним та пульсуючим оплавленням. Спектр сигналу МП має суцільний характер і зміщений переважно в діапазон частот 0...5 і 5...50 Гц з менш жорсткими ГДР. У ділянці ніг та рук зварника у цьому діапазоні частот *MFI* має надто низькі значення, відповідно 0,004 та 0,32, що значно менше одиниці. А у діапазоні 50...1000 Гц – практично дорівнює одиниці. Тому $T_{зв,доп}$ приблизно становить 8 годин. Причому в інструкції з експлуатації даного обладнання наведено рекомендації щодо захисту здоров'я зварника, який безпосередньо працює з цим обладнанням.

Такі гігієнічні переваги даного зварювального обладнання можна пояснити застосуванням постійного струму і відсутністю пристрою його фазового керування.

Для конденсаторного точкового зварювання листового металу на постійному струмі характерно, що форма зварювального струму у вигляді короткочасного експоненціального відеоімпульсу [14] визначає суцільний спектр МП. Складові спектру в частотному діапазоні 5...1000 Гц, головним чином, визначають санітарні проблеми цього способу (табл. 3). Так, у ділянці грудей зварника в діапазоні частот 50...1000 і 1000...10000 *MFI* мають досить низькі значення – 0,002 та 0,54, відповідно, що значно менше одиниці. А у ділянці ніг та рук зварника лише в діапазоні 1000...10000 Гц цей показник становить 14,1, що і визначає допустимий час роботи зварника – всього 0,6 год (36 хв) на протязі восьмигодинної робочої зміни.

Таким чином, результати виконаної гігієнічної оцінки магнітних полів у відповідності з новими нормативами дали можливість встановити наступні закономірності:

- контактне стикове зварювання характеризується перевищенням гранично допустимого рівня МП у високочастотному діапазоні 5...50 і 50...100 Гц на відстані до 0,5 м від зварювальної машини при безперервному оплавленні та на відстані 1,5 м при пульсуючому оплавленні;

- при дуговому стиковому зварюванні на робочому місці зварника перевищення гранично допустимих рівнів магнітного поля не виявлено;

- конденсаторне точкове зварювання постійним струмом характеризується перевищенням гранично допустимого МП на робочому місці у високочастотному діапазоні 1000...10000 Гц.

Результати виконаних досліджень дають можливість запропонувати практичні рекомендації щодо мінімізації шкідливої дії магнітних полів на організм операторів контактного зварювання.

При застосуванні контактного стикового зварювання робоче місце оператора має розташовуватись на відстані не ближче 0,5 м від зварювальної машини при безперервному оплавленні та не ближче 1,5 м при пульсуючому оплавленні.

Дугове стикове зварювання на відміну від контактного точкового не становить небезпеки для зварників. Проте при ручному зварюванні електродний кабельне повинен обвиватися навколо тіла зварника.

Конденсаторне точкове зварювання має обмежений час роботи і потребує розташування робочого місця на безпечній відстані від зварювальних електродів.

Отримані результати свідчать про те, що всі досліджені способи контактного зварювання, ок-

рім дугове стикового, характеризуються підвищеним рівнем МП у порівнянні з електродуговим зварюванням [10]. Вони суттєво відрізняються між собою в залежності від виду джерела живлення електричним струмом, величини та виду зварювального струму.

Підвищені рівні МП при контактному стиковому зварюванні машиною К-1000 безперервним і пульсуючим оплавленням залізничних рейок обумовлено, переважно, наявністю у складі індуктованих МП досить інтенсивних високочастотних гармонічних сигналів у діапазоні 50...1000 Гц (див. табл. 1). Нормативні ж значення [13] у цьому діапазоні частот приблизно в 15 разів нижчі, ніж у діапазоні 5...50 Гц. Це і є головною причиною суттєвого скорочення допустимого часу роботи оператора-зварника. При цьому умови праці оператора-зварника залежать від відстані до корпусу машини. Взагалі, при зварюванні безперервним оплавленням допустимий час роботи зварника більший, ніж при пульсуючому оплавленні. Це пояснюється тим, що пульсуюче оплавлення відповідно здійснюється імпульсним змінним струмом з амплітудною модуляцією, що і призводить до генерування більш високих рівнів МП за рахунок його самоіндукції від цих імпульсів. Тому допустима робоча зона зварника при безперервному оплавленні починається на відстані 0,5 м, а при пульсуючому оплавленні на відстані 1,5 м. Цим і визначається місце безпечного розташування робочого місця оператора-зварника.

Дугове стикове контактне точкове зварювання пістолетом «ЕЛОТОР-502» для приварки шпильок має незрівнянні переваги в гігієнічному відношенні (табл. 2). Це пояснюється тим, що дане обладнання частково поєднує в собі переваги дугового зварювання [10] і недоліки контактного [12]. Воно працює на постійному імпульсному струмі, який створюється трифазним трансформатором з тиристорним випрямлячем і електронним блоком керування електричним сигналом, що і знижує можливість генерування МП за рахунок струмів самоіндукції. Все зазначене дозволяє зварнику працювати повну восьмигодинну робочу зміну.

Конденсаторне точкове зварювання листового металу стаціонарною машиною МТК-2201 має свої суттєві недоліки щодо рівня МП (табл. 3), що створюється постійним струмом, який зазвичай має гігієнічні переваги у порівнянні зі змінним струмом. Високий же рівень МП у цьому випадку пояснюється характерною формою сигналів зварювального струму у вигляді короткочасного експоненціального відеоімпульсу [14], який визначає спектр МП. Такі сигнали генерують періодичні імпульсні МП збільшеної амплітуди за рахунок енергії, що періодично виникає в проце-

сі заряджання і розряджання конденсатора джерела живлення електричним струмом. Наявність таких МП, особливо, у діапазоні високих частот 1000–10000 Гц, нормативні значення яких ще нижчі, ніж у діапазоні 50...1000 Гц, суттєво знижує допустимий час роботи зварника.

Таким чином, отримані результати досліджень дають можливість розробляти рекомендації щодо мінімізації небезпечної дії МП на організм зварників при подальшій модернізації даного обладнання контактного зварювання. При цьому важливо правильно вибрати відстань до безпечної робочої зони оператора-зварника та місця встановлення пульта керування процесом зварювання.

Висновки

1. Визначено напруженість характерних для контактного зварювання полічастотних МП у встановлених нормативами діапазонах, загальні показники їх рівнів та допустимий час роботи зварника при застосуванні різних способів контактного зварювання.

2. На основі отриманих результатів виконано гігієнічну оцінку МП у відповідності з установленими нормативами для подальшого розроблення рекомендацій зі захисту зварників.

3. Результати виконаних досліджень дають можливість запропонувати практичні рекомендації щодо мінімізації шкідливої дії МП на організм операторів контактного зварювання, які полягають у наступному:

– при застосуванні контактного стикового зварювання робоче місце оператора має розташовуватись на відстані не ближче 0,5 м від зварювальної машини при безперервному оплавленні та не ближче 1,5 м при пульсуючому оплавленні;

– дугове стикове зварювання на відміну від контактного стикового зварювання не становить небезпеки для зварників, проте при ручному зварюванні електродний кабель не повинен обвиватися навколо тіла зварника;

– конденсаторне точкове зварювання має обмежений час роботи і потребує розташування робочого місця на безпечній відстані від зварювальних електродів.

Список літератури/References

1. Modenese, A., Gobba, F. (2021) Occupational Exposure to Electromagnetic Fields and Health Surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1730. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18041730>
2. Stam, R. (2018) *Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)*. <https://rivm.openrepository.com/bitstream/handle/10029/623629/2018998.pdf?sequence=1>
3. Fuentes, M.A., Trakic, A., Wilson, S.J. et al. (2008) Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Transactions*

- on *Biomedical Engineering*, 55(4), 1355–1364. DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.2007.913410>
4. Yamaguchi-Sekino, S., Ojima, J., Sekino, M., et al. (2011). Measuring exposed magnetic fields of welders in working time. *Industrial health*, 49(3), 274–279. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1269>
 5. Weingrill, L., Krutzler, J., Enzinger, N. (2016) Temperature Field Evolution during Flash Butt Welding of Railway Rails. *Materials Science Forum*, 879, 2088–2093. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.879.2088>
 6. Gotawala, N., Shrivastava, A. (2020) Microstructural analysis and mechanical behavior of SS 304 and titanium joint from friction stir butt welding. *Materials Science and Engineering: A*, 789, 139658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139658>
 7. Vates, U.K., Sharma, B.P., Kanu, N.J. et al. (2020) Optimization of Process Parameters of Galvanizing Steel in Resistance Seam Welding Using RSM. *Proceedings of International Conference in Mechanical and Energy Technology. Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer, Singapore, 7–8 November*, 174. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2647-3_65
 8. Hu, S., Haselhuhn, A.S., Ma, Y. et al. (2022) Effect of external magnetic field on resistance spot welding of aluminium to steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 27(2), 84–91. DOI: 10.1080/13621718.2021.2013707
 9. Qi, L., Zhang, Q., Niu, S. et al. (2021) Influencing mechanism of an external magnetic field on fluid flow, heat transfer and microstructure in aluminum resistance spot welding. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 985–1001. DOI: 10.1080/19942060.2021.1938684
 10. Levchenko, O., Polukarov, Y., Goncharova, O. et al. (2022). Determining patterns in the generation of magnetic fields when using different arc welding techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (116)), 50–56. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254471>
 11. Левченко О. (2020) Методологія визначення рівня полічастотного магнітного поля в робочій зоні зварника. *Проблеми охорони праці в Україні*, 36(4), 3-7. DOI: 10.36804/nndipbop.36-4.2020.3–7.
Levchenko, O. (2020) Procedure of determination of multi-frequency magnetic field in working zone of welder. *Problemy Ohorony Pratsi v Ukraini*, 36(4), 3-7. DOI: 10.36804/nndipbop.36-4.2020.3–7.
 12. Levchenko, O., Polukarov, Y., Goncharova, et al. (2022) Determining patterns in the generation of magnetic fields when using different contact welding techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10 (120)), 46–53. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268699>
 13. *Напруженість електромагнітних полів промислової частоти (2002) ДСН 3.3.6.096-2002*. Київ, МОЗ, 16. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text>.
DSN 3.3.6.096-2002: Magnetic field intensity of commercial frequency (2002). Kyiv, Ministry of Health of Ukraine, 16. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text>.
 14. Tan, L., Jiang, J. (2018) *Digital signal processing: fundamentals and applications*. Academic Press. https://books.google.com/DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Digital+signal+pro.ua/books?hl=ru&lr=&id=MxlXcessing&ots=p9iTQfnj5H&sig=tqYZ9nRgZeDfoC1nvPB6thm-LbxA&redir_esc=y#v=onepage&q=Digital%20signal%20processing&f=false

HYGIENIC CHARACTERISTICS AND REGULARITIES OF GENERATING MAGNETIC FIELDS IN DIFFERENT METHODS OF RESISTANCE WELDING

O.G. Levchenko¹, Yu.O. Polukarov¹, O.M. Goncharova², O.M. Bezushko²

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine
E-mail: levchenko.opcb@ukr.net

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: goncharova.olga789@gmail.com

The levels and spectral composition of the magnetic fields generated by the equipment for resistance welding in different methods was determined in order to evaluate their effect on the body of welders. Analysis of literary sources regarding resistance welding showed almost complete lack of information on electromagnetic safety of the mentioned welding methods. The proposed methodological approaches to determination of the levels of magnetic fields, means of measurements and methods of evaluating their effect on the welder's body are given. On the basis of the analysis and processing of the obtained oscillograms and spectrograms of magnetic fields, the measurement of their frequency and quantitative characteristics was performed. To determine the overall level of the polyfrequency magnetic field generated during resistance welding, the proposed generalized indicator of the level of the magnetic field was used. It was established that in flash-butt and capacitor-discharge spot welding, the excess of the admissible level of magnetic field is predetermined by the shape of welding current and the presence of powerful harmonic signals in the frequency ranges of 50...1000 and 1000...10000 Hz in their range. It is shown that the spectral composition and the magnitude of the magnetic field signal are determined mainly by the welding method itself and the output parameters of the power sources. It is shown that it is possible to perform flash-butt and capacitor-discharge spot welding in a stationary method with placing the workplace (control panel) at a certain distance from the welding electrodes. Unlike these methods of joining metals, flash-butt welding is not dangerous to welders. However, in manual welding, the electrode cable should not wrap around the welder's body. 14 Ref., 3 Tabl., 2 Fig.

Keywords: flash-butt welding, magnetic field, frequency, intensity, standard, indicators, recommendations

Надійшла до редакції 27.03.23



INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING
A world of joining experience

iiwelding.org

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗВАРЮВАННЯ В КОСМОСІ*

Б.Є. Патон

Останнє десятиліття знаменується величезними досягненнями людства в освоєнні космічного простору. Вони стали можливими завдяки бурхливому розвитку науки та техніки, створенню нових галузей науки. Можна без перебільшення сказати, що космічні дослідження сприяли справжній науково-технічній революції, що мала величезний вплив і продовжує впливати на розвиток усієї нашої техніки та промисловості.

Зварники з великою гордістю та задоволенням відзначають, що створення сучасних ракетно-космічних систем стало можливим лише на основі застосування високонадійних та економічних зварних конструкцій, завдяки розробці та освоєнню нових способів та технологічних процесів зварювання.

Якщо перший етап космічних досліджень потребував бурхливого розвитку зварювальної науки і техніки, зварювального виробництва на нашій планеті, то другий етап, пов'язаний з польотами до інших планет і висадженням на них людини, вимагатиме якісно нових рішень, створення космічної зварювальної техніки.

Не можна уявити збирання на навколосемних орбітах міжпланетних кораблів, створення орбітальних станцій-лабораторій, будівництво на інших планетах різних споруд, нарешті всілякі ремонтні роботи поза та всередині космічних кораблів без найширшого застосування зварювання та різання.

Задачі зварювання та різання в космосі. Як відомо, при освоєнні навколосемного космосу всі ракети і космічні кораблі будувались і збирались повністю на Землі. Після виходу на задану орбіту корабель від'єднувався від останнього ступеня ракети і практично був готовий до подальшої роботи. Скидання захисних кожухів та обтічників, випускання антен, розкриття сонячних батарей та інші операції виконувались системами управління, що існували на кораблі.

Зі створенням важких міжпланетних кораблів, орбітальних космічних станцій-лабораторій виникає необхідність виводу на орбіту значно більших корисних навантажень, у зв'язку з цим раціональним стає збирання об'єктів на орбіті з окремих блоків, що були доставлені туди заздалегідь.

Створення кораблів і станцій безпосередньо на орбіті дозволить застосовувати конструкції, що найбільш пристосовані до орбітальних умов,

конструкції, які просто не можуть бути створені на Землі та у зібраному вигляді виведені на орбіту.

У цьому випадку кораблі і станції будуть збиратися з різних елементів, у тому числі з останніх ступенів ракет, відпрацьованих паливних баків, а також з типових блоків, що мають оптимальне співвідношення ваги до корисного об'єму. Зібрані конструкції повинні мати досконалу герметизацію, чого найпростіше досягти, застосовуючи зварювання. Тут потрібні різні способи зварювання та різання, спеціальне обладнання, що враховує специфіку космічних умов, на чому ми зупинимося нижче. Поки зазначимо, що при зварюванні об'єктів на орбіті повинні використовуватися повністю автоматизовані процеси з дистанційним управлінням, аналогічні до тих, що використовуються на Землі при роботі з атомними реакторами та капсулами з радіоактивними речовинами, а також полуавтоматичні та ручні процеси зварювання, які виконуються безпосередньо людиною.

У найближчі роки людина повинна висадитися на Місяць. Слідом за першою висадкою виникає необхідність будівництва на Місяці спеціальних укриттів, що забезпечують нормальні умови існування людей без застосування спеціального захисного одягу, й окремих приміщень для роботи, відпочинку та приймання їжі. Окремі блоки цих укриттів буде доставлено з Землі, а їх збирання та зварювання повинні бути зроблені на Місяці в умовах вакууму та сили тяжіння, що складає 1/6 від нашої земної.

Конструкції цих укриттів будуть досить складними, враховуючи необхідність створення надійного протирадіаційного і протиметеоритного захисту, а також повної герметичності.

Обмежені об'єми космічних кораблів, що запускаються, можуть потребувати також використання конструкцій, що трансформуються. До них слід віднести складчасті, рулоновані, телескопічні, надувні металеві конструкції. Розглядаються також пружні газонепроникні тканини, що легко складаються; конструкції з використанням мембрани та надувні сотові конструкції; складчасті конструкції, основою яких є гнучкі матеріали, що являють собою високостійкі герметичні тканини та плівки. У майбутньому можливе створення кераміки, яка буде значно легше за металеві сплави. У той же час вона буде стійкішою до зносу та зміни температури, не

*Матеріали з архіву акад. Б.Є. Патона (кінець 60-х років минулого століття).

підлягатиме корозії, матиме необхідні теплоізоляційні властивості. Все це дуже важливо при створенні виробів аерокосмічного призначення.

Збирання та зварювання металевих і неметалевих місячних укріплень потребують створення спеціального зварювального обладнання, яке може відрізнитися від застосованого для виконання зварювальних операцій на орбітах.

Виконання ремонтних операцій на орбіті висуває дуже серйозні вимоги до зварювального обладнання.

Цілком очевидно, що при ремонті ушкоджень, що виникли з-за метеоритних частинок, місце ушкодження не може бути заздалегідь передбачено. Тому зварювальне обладнання повинно забезпечувати можливість виконання ремонтних робіт у будь-якому місці конструкції. Якщо мова йде про теплообмінники ядерних установок, то очевидно, що зварювальні ремонтні роботи повинні виконуватись дистанційно без безпосередньої участі людини.

Спосіб зварювання, «накладок-латок» у місці дефекту, який виник, істотно залежить від середовища на об'єкті, що ремонтується.

Так, наприклад, киснева атмосфера всередині космічних кораблів створює суттєві труднощі для застосування способів зварювання, що супроводжуються високими температурами та в окремих випадках розбризкуванням розплавленого металу.

Ремонтні зварювальні операції можуть знадобитися і при посадках кораблів на інші планети, у тому числі і на Місяць. За допомогою різання та зварювання необхідно буде усувати пошкодження, що виникають при посадках кораблів.

На підставі сказаного ясно, що для виконання ремонтних робіт в космосі необхідні автоматичні, напівавтоматичні та ручні способи зварювання та різання.

Зрештою, треба сказати, що холодне зварювання, яке легко може бути здійснено в космічному вакуумі, є також і великою небезпекою. Космічний корабель може перестати нормально функціонувати внаслідок приварювання стопорних пристроїв у люках, шлюзах та інших конструкціях. Можуть вийти з ладу найважливіші системи управління, якщо приваряться електричні контакти. Під дією надвисокого космічного вакууму будуть випарюватися густе масло та мастило. Будуть також випаровуватись плівки адсорбованих газів і домішок, які утворилися в атмосфері. Видалення цих плівок дозволяє отримати щільний контакт металевих поверхонь, у результаті чого для зварювання необхідний дуже невеликий питомий тиск і невеликий нагрів.

Таким чином, поряд з корисним використанням холодного зварювання в космосі треба створювати умови, що перешкоджають довільному холодному зварюванню різних вузлів, у першу чергу, що виконані з м'яких металів.

З урахуванням задач зварювання в космосі, які можуть бути сформульовані вже сьогодні, можна надати наступну класифікацію космічного зварювального обладнання: автоматична апаратура разової дії з програмним управлінням, що монтується в місцях майбутніх зварних з'єднань ще на Землі; автоматична апаратура багаторазової дії, що керується дистанційно за допомогою механічних маніпуляторів або телевізійних установок; апаратура-інструмент для автоматичного зварювання, якою безпосередньо керує зварник-космонавт; зварювальний інструмент для ручного та напівавтоматичного зварювання, яким керує вручну зварник-космонавт.

Особливості зварювання в космосі. При розробці способів зварювання та обладнання потрібно враховувати властивості космічного простору: невагомість; вакуум; коливання температури; випромінювання; електричне та магнітне поле Землі та Місяця.

Розглянемо коротко можливий вплив цих факторів на процеси зварювання та різання. Необхідно враховувати вплив космічних умов на хід фізико-хімічних процесів при різних способах зварювання та на можливість проведення збирання та зварювання людиною.

Почнемо з першого. Знаходячись у космосі, людина перебуває у стані невагомості в глибокому вакуумі. Тому вона повинна одягти досить об'ємний космічний скафандр, що утруднює рухи.

Звичайні інструменти (гайкові ключі, викрутки, дрилі тощо), а також звичайні зварювальні пристрої будуть непридатними, коли людина знаходиться в стані невагомості. Тут потрібні інструменти з нульовою реакцією, тобто інструменти, які не передають оператору ніяких зворотних сил. Дуже серйозною проблемою є збирання в космосі конструкцій, які потребують зварювання. Для запобігання переміщень космонавта, що не зв'язаний жорстко з корпусом корабля, при виконанні різних робіт у космосі необхідно застосовувати інструмент з фіксаторами, що сприймають реактивний момент, або спеціальний інструмент з дуже невеликим реактивним моментом, що діє на космонавта. Там, де це практично можливо, доцільно виконувати складні роботи при жорсткому кріпленні космонавта до корпусу корабля (рис. 1). Для цього можуть бути використані механічні

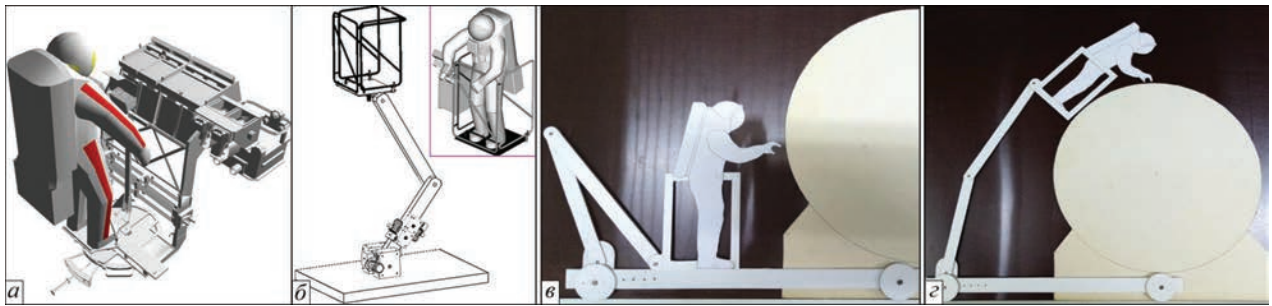


Рис. 1. Робоче місце космонавта для виконання технологічних робіт у відкритому космосі: *а* — загальне компонування площадки оператора-зварника зі зварювальним інструментом; *б* — площадка оператора-зварника; *в* — маніпулятор робочого місця; *г* — робоче місце оператора-зварника (проміжні фази положення робочого місця під час обслуговування модуля)

складні або роздвигні пристрої, магніти та клейкі речовини.

Використання магнітів небажане внаслідок впливу магнітних полів на роботу електронної апаратури корабля та зварювальних установок. Крім того, для кораблів і станцій широко застосовуються немагнітні матеріали. Цікавим є використання різних маніпуляторів, що є аналогічними до розроблених для атомної промисловості та для виконання робіт в умовах, небезпечних для життя космонавта (рис. 2).

При збиранні різних конструкцій на орбіті одним з рішень може бути установка легких зварювальних автоматів поблизу майбутніх зварних швів ще на Землі. Ними керують з Центрального пульта та вони використовуються тільки одноразово. Проте збирання кораблів і станцій на орбіті потребує також і ручного виконання низки збиральних і зварювальних робіт в таких умовах, коли жорстке кріплення тіла космонавта до корпусу корабля неможливе. У цьому випадку однією з основних задач є розробка способів стабілізації тіла людини. Тут можуть бути використані наспинні установки з системою газодинамічних рулів і різного виду гіроплатформи, які поглинають моменти, що виникають при роботі космонавта.

Цілком очевидно, що проблема стабілізації тіла космонавта-зварника, можливість точного виконання їм достатньо складних рухів, що забезпечують якісне зварювання на орбіті, є однією зі складніших задач у загальному комплексі зварювання в космосі (рис. 1, *г*).

Космічні умови суттєво впливають на характер фізико-хімічних процесів при зварюванні. Так, наприклад, невагомість може докорінно впливати на процес перенесення металу в дузі при зварюванні плавким електродом. Внаслідок обмеженої потужності джерела живлення в космічному кораблі зварювання відбувається при порівняно невеликих струмах дуги, коли електродинамічне зусилля, потрібне, щоб відірвати краплю, також є невеликим. У результаті на кінці електрода утворюватимуться

краплі великого розміру, що часто відриваються під впливом випадкових чинників. При цьому вони можуть не потрапити в зварювальну ванну, а «попливти» у космічному просторі. Невагомість не дозволить проводити зварювання плавленням у космосі при великих об'ємах рідкого металу в зварювальній ванні, тому що при цьому не буде забезпечено нормальне формування та кристалізація зварного шва. Невагомість також може негативно впливати на дегазацію зварювальної ванни, тому що відсутність сили тяжіння не дозволить нормально спливати та виділятися бульбашкам газу, що знаходяться в рідкому металі. Невагомість не дозволить застосовувати в космічних умовах шлаковий захист і обробку шлаком металу зварювальної ванни при дуговому зварюванні плавким електродом.

Глибокий вакуум у космосі (до 10^{-12} мм рт. ст.) також суттєво впливає на характер протікання процесів зварювання. При такому вакуумі є неможливим горіння дуги з неплавким електродом. При використанні плавкого електрода є можливим горіння дуги в парах металу. Проте і в цьому випадку для стабілізації дугового розряду слід приймати спеціальні заходи.

В умовах глибокого космічного вакууму можна отримати задовільні результати, застосовуючи плазмову дугу. Проте тут вже є потреба в доставці в космос плазموутворюючого газу. Захисний газ, наприклад аргон, дозволить також виконува-

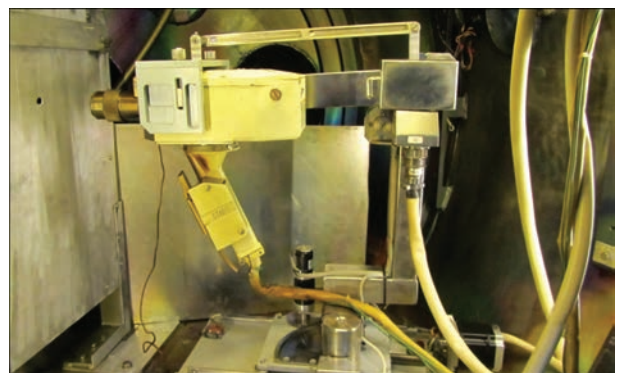


Рис. 2. Маніпулятор з ручною електронно-променевою гарматою, що розташована в камері

ти в космосі аргонодугове зварювання неплавким електродом. Глибокий вакуум може вплинути і на фізико-хімічні процеси, що відбуваються при зварюванні плавленням, особливо при наявності порівняно великих об'ємів рідкого металу.

Разом з тим, для низки способів зварювання наявність глибокого вакууму в космосі виявиться дуже корисним. До них належать електронно-променеве, дифузійне, холодне зварювання, а також зварювання вибухом. Якщо при перших трьох способах глибокий вакуум сприяє створенню найкращих умов для власне процесу зварювання, то при вибуху вакуум виключає можливість утворення вибухової хвилі, що є дуже важливим для безпеки проведення зварювальних робіт.

Рух околосезною орбітою з висотою приблизно 300 км супроводжується частою зміною дня та ночі — за кожні 90 хв. польоту 45 хв. людина знаходиться в темряві. Великої актуальності набуває також адаптація людини до сонячних променів, яскравість яких подвоюється. З'являється необхідність у створенні штучного освітлення робочого місця зварника-космонавта.

Суттєвий вплив на характер протікання процесів зварювання та якість зварних з'єднань можуть надавати коливання температури на околосезних орбітах у межах $-100...+120$ °С і на поверхні Міся-

ця в межах $-150...+130$ °С. Це обов'язково потрібно враховувати при виборі способу та розробці технології зварювання.

Мабуть, для більшості способів зварювання, які реально будуть застосовані в космосі, можна не враховувати корпускулярну радіацію, дію магнітного та електричного полів і електромагнітного випромінювання.

Крім сказаного вище, до зварювального обладнання, що придатне до використання в космосі, повинно бути висонуте ряд спеціальних вимог: мінімальна вага; мала енергоємність; висока надійність; простота використання та управління; безпека.

Перейдемо до розгляду різних способів зварювання та різання, які можуть бути застосовані в космосі.

Способи зварювання та різання, які можуть бути використані в космосі. Електронно-променеве зварювання. Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) — спосіб зварювання, який все більше розповсюджується на Землі, у том числі і при виробництві ракет, ракетних двигунів і космічних кораблів. Якщо на Землі для проведення ЕПЗ зварювані конструкції необхідно розміщати у вакуумних камерах, то в космосі існує природний глибокий вакуум, що спрощує застосування цього способу.

Висока концентрація енергії, що притаманна ЕПЗ, також є дуже корисною в космосі, тому що забезпечує мінімальне тепловкладення в зварюваний метал і мінімальну потужність усієї установки. Крім того, таку установку можна використовувати і для різання, тобто вона має дуже важливий для космоса універсалізм.

Дослідження показують, що для виконання робіт зі зварювання та різання в космосі достатньою є потужність 1...3 кВт при прискорюючій напрузі 15...20 кВт. Така установка може живитися електроенергією від бортової мережі космічного корабля. Блок-схему установки для ЕПЗ у космосі для проведення наземних випробувань наведено на рис. 3. Загальний вигляд установки наведено на рис. 4. Апаратура для ЕПЗ та різання в космосі є досить простою та надійною в експлуатації і має цілком задовільні вагові характеристики. ЕПЗ є придатним для з'єднання широкого діапазону металів, включаючи всі, які використовуються на даний час у космічних конструкціях.

Невагомість практично не позначається на процесі ЕПЗ, тому що ванночка рідкого металу має дуже малий об'єм.

Проте невагомість може призвести до випадкового відриву крапель розплавленого металу під час зварювання і особливо різання. Бризки розплавлен-

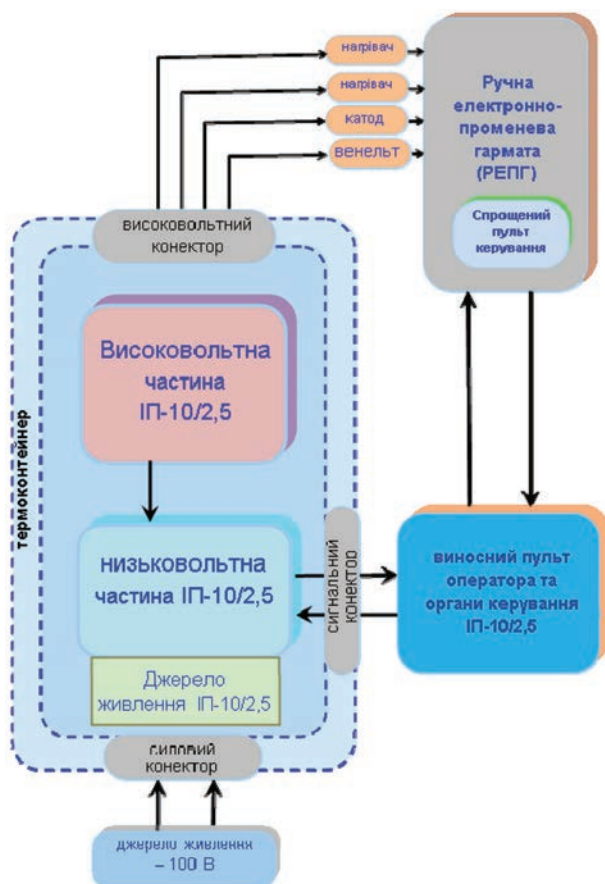


Рис. 3. Блок-схема установки для ЕПЗ в космосі

ного металу здатні руйнувати окремі поверхні. Вони становлять велику небезпеку для скафандра космонавта та для деяких синтетичних матеріалів.

Вакуум полегшує випаровування поверхневих окисних плівок і виключає забруднення металу шва, завдяки чому досягається відсутність дефектів у шві.

Слід враховувати, що ЕПЗ висуває підвищені вимоги до якості збирання, що може викликати деякі труднощі насамперед при виконанні ремонтних робіт. При проведенні ЕПЗ вручну необхідно створити спеціальні пристрої, які унеможливають ураження скафандра космонавта електронним променем. Цього можна досягти електричним і механічним шляхом. Необхідно зазначити, що пост для ЕПЗ легко побудувати так, щоб він мав високу маневрність і космонавт міг працювати однією й тією ж електронною гарматою зовні та всередині космічного корабля (звичайно, за умови розгерметизації останнього).

Аргонодугове зварювання неплавким електродом. Цей широко відомий спосіб зварювання не потребує спеціального опису та пояснень. У космічних умовах він значно поступається ЕПЗ. Концентрація енергії тут значно менша, ніж при ЕПЗ. У результаті різко зростає зона термічного впливу, збільшується ванночка рідкого металу, збільшується небезпека довільного «плавання» у невагомості крапель металу. Витрата аргону навіть при помірних режимах досягає 15...20 л/хв., що приведе до необхідності транспортування в космос спеціальних ємностей з аргонем. Застосування аргону в космічному вакуумі викликано не необхідністю захисту металу шва, а лише стабілізацією дугового розряду. Відносно велика кількість аргону, що витікає з сопла пальника, підвищує реактивність такого інструмента. Це робить ще більш сумнівною доцільність застосування аргонодугового зварювання. Діапазон металів, що зварюються ЕПЗ, є значно ширшим, ніж при аргонодуговому зварюванні. Позначені недоліки роблять аргонодугове зварювання неплавким електродом мало перспективним для застосування в космічних умовах.

Плазмово-дугове зварювання. Цей спосіб зварювання, на відміну від звичайного аргонодугового зварювання, забезпечує значно більшу концентрацію енергії та широкі можливості її регулювання. Витрата аргону тут є значно меншою (у 5...6 разів), ніж при звичайному аргонодуговому зварюванні. Крім цього, плазмово-дуговий пальник є практично однаково придатним для зварювання та різання, що є великою перевагою при його використанні в космічному просторі. При застосуванні помірних режимів (1...3 кВт), мабуть можна обійтися без примусового охолодження



Рис. 4. Загальний вигляд обладнання для відпрацювання електронно-променевих технологічних процесів в наземних умовах

сопла пальника в космічному вакуумі. Це є дуже важливою обставиною. Ще цікавішою для використання в космосі є так звана мікроплазма. Тут за допомогою високочастотного генератора (осцилятора) збуджується допоміжна незалежна дуга між вольфрамовим електродом і мідним соплом. Плазоутворюючим газом є аргон. Сила струму ~ 2 А. При замиканні на зварюваний метал чергова дуга розтягується та збуджується основна дуга між вольфрамовим електродом і металом. Основна дуга, що стискається потоком аргону з 5...7 % водню, має форму голки. При рекомбінації атомів водню на зварюваному металі виділяється додаткова кількість тепла. Струм основної дуги може змінюватися в широкому діапазоні 0,2...20 А. Цей спосіб дає дуже високу концентрацію енергії, що вже порівняно з такою для електронного променя. Голкоподібна мікроплазма дозволяє зварювати метал завтовшки від 0,01 мм і вище. Обладнання для цього способу зварювання значно простіше та дешевше, ніж для ЕПЗ. Цей спосіб є однаково придатним для використання в глибокому космічному вакуумі та всередині космічного корабля (звісно, при виборі безпечної атмосфери в кабіні). Це вигідно відрізняє даний спосіб від ЕПЗ. Суттєвим недоліком мікроплазми є необхідність транспортування в космос аргону і водню. Проте плазмово-дугове зварювання та різання (звичайне та мікро) все ж має деякі перспективи застосування в космічних умовах.

Дугове зварювання плавким електродом. Цей вид зварювання є цікавим для космічних умов. Особливо це стосується спорудження різних зварних конструкцій на інших планетах, а також ремонтних робіт. Тут може бути пред'явлено менш жорсткі вимоги до якості збирання, ніж при ЕПЗ і мікроплазмовому зварюванні. Досліди показали, що в парах металу, що плавиться, можна досягти досить стійкого горіння дуги навіть в умовах

глибокого космічного вакууму. Проте якщо не застосовувати спеціальних заходів, то дуга легко перекидається на струмопідвідні та інші вузли зварювальної головки. Найрадикальнішим є створення умов, що забезпечують чітке відшнуровування стовпа дуги. Ми вже відзначали труднощі, що виникають при керуванні перенесенням металу в дузі в умовах невагомості. Досвід показує, що нормалізації процесу перенесення металу можна досягти двома шляхами. Якщо зварюваний метал і потужність джерела живлення дозволяють застосувати досить «жорсткі» режими зварювання (щільність струму в електроді не менше за 100 А/мм^2), то процес перенесення металу є цілком задовільним. У цих умовах електродинамічне зусилля, що впливає на краплю металу, яка знаходиться на кінці електрода, цілком достатньо для відриву краплі при відсутності сили тяжіння та забезпечення дрібнокрапельного перенесення металу. Якщо ж необхідно застосувати малий струм дуги, то електродинамічне зусилля, що створюється власне струмом дуги, виявляється недостатнім для відриву крапель з кінця електрода. Тут для керування процесом перенесення металу можна з успіхом застосувати імпульсно-дугове зварювання, тобто накладення на основний струм зварювальної дуги короткочасних імпульсів струму, що забезпечують створення імпульсів електродинамічної сили, яка відриває краплі з кінця електрода. Генератори імпульсів (ГІ) підключаються паралельно до основного джерела живлення зварювальної дуги. Створення ГІ для космічних умов не становить труднощів, тому що тут застосовуються порівняно малі зварювальні струми (40...80 А). При цьому амплітуда струму в імпульсі повинна дорівнювати 250...500 А, а його тривалість — 1,5...2 мс. Слід пам'ятати про необхідність прийняття спеціальних заходів, що виключають можливість «холодного зварювання» електродним дротом з подаючими роликками та струмопідвідним пристроєм зварювальної головки в глибокому вакуумі. Крім того, при конструюванні механізмів зварювальної головки треба задовольнити всі вимоги, що висувуються до механізмів, які працюють у космосі. Мабуть, дугове зварювання плавким електродом може знайти деяке застосування в космічних умовах, особливо при освоєнні інших планет.

Точкове зварювання. Точкове зварювання може застосовуватись в космосі для прихватування різних деталей при збиранні конструкцій на орбіті, а також на Місяці та на інших планетах. Точкове зварювання може бути використане і при ремонтних роботах, наприклад, для прихватування латок при метеоритних пробоях космічних кораблів.

Особливо перспективним є точкове зварювання у поєднанні з герметизуючими пастами і клеями, що пристосовані для роботи в космічному вакуумі. Точкові кліщі можуть бути виконані із вбудованими трансформаторами, якщо останні живляться струмами підвищеної частоти (500...1000 Гц). У цьому випадку необхідно застосовувати трансформатор потужністю 1 кВт. Космічні умови не впливають на процес точкового зварювання. У цьому випадку невагомість впливає лише на умови роботи людини. Мабуть точкове зварювання знайде застосування в космосі. Живлення кліщів струмами підвищеної частоти не становить труднощів, тому що ЕПЗ потребує перетворення постійного струму від бортової мережі або автономних акумуляторів у змінний струм і наступне підвищення напруги змінного струму. Отриманий на виході інвертора змінний струм може бути використаний для живлення кліщів для точкового зварювання.

Холодне зварювання. Великий об'єм і складність електричного та електронного обладнання космічного корабля збільшує ймовірність відмови його елементів під час польоту. Пошук місць ушкоджень і ремонт електроланцюга є однією з типових операцій під час польоту. Мабуть, обрив дротів можна буде у певних випадках усувати за допомогою холодного зварювання. Для холодного зварювання дротів можуть бути використані кліщі, аналогічні тим, що застосовуються на Землі. Цілком очевидно, що невагомість не впливає на якість з'єднання, що виконано холодним зварюванням. Було проведено ряд експериментів для детального вивчення холодного зварювання. Зварювані деталі очищали дротяною щіткою та виконували холодне зварювання у вакуумі 10^{-13} тор, що відповідає навколоземним орбітам. Було отримано найкращі результати при холодному зварюванні міді, алюмінію та золота. Деяко гірші результати було отримано при холодному зварюванні сталі та титану. Головною перевагою холодного зварювання є можливість з'єднання металів без нагріву, що призводить до знеміцнення, а також відсутність досить важких джерел нагріву. Цікавим є холодне зварювання в космосі з використанням ультразвукових коливань і іонних пучків. Холодне зварювання в певних випадках може успішно доповнити способи зварювання плавленням, які будуть застосовуватись у космосі.

Дифузійне зварювання. Дифузійне зварювання також може бути успішно виконано в космічному вакуумі. Підвищена дифузія речовин у глибокому космічному вакуумі сприяє очищенню поверхонь металів від забруднень. Це дуже важливо для отримання якісних зварних з'єднань. Недоліком ди-

фузійного зварювання в космосі є необхідність нагріву, тобто необхідність у наявності відповідних джерел нагріву. Крім того, нагрів, що застосовується при дифузійному зварюванні, приведе до певного зменшення металу в зоні зварювання. Ми вважаємо, що класичне дифузійне зварювання не має перспектив застосування в космосі. Поряд з тим, певний інтерес для космоса представляє тверде паяння і так зване паяння з різними прошарками.

Зварювання тертям. Цей вид зварювання потребує наявності елементів, що обертаються, які створюють достатню для отримання зварного з'єднання кількість тепла. Вакуум і невагомість не матимуть шкідливого впливу на процес зварювання тертям. Проте створення інструмента з механізмом обертання пов'язано з великими труднощами внаслідок необхідності компенсації реактивного зусилля. Мабуть, зварювання тертям не отримає застосування в космосі.

Зварювання та різання вибухом. Ми вже вказували, що глибокий космічний вакуум сприяє хорошему очищенню зварюваних поверхонь. Зварювання вибухом дозволяє отримати досить міцні накладні з'єднання однорідних і разнорідних металів. Час зварювання вибухом може змінюватись у широких межах – від однієї мікросекунди до декількох секунд або навіть десятків секунд. Компактність і невелика вага вибухівки також є перевагою способу. Цей метод, мабуть, можливо використовувати і для збирання з наступним зварюванням. Труднощі застосування зварювання вибухом полягають в правильному підборі величини вибухового заряду та місця встановлення заряду. Ці труднощі можуть стати дуже суттєвими в космічних умовах. Великі перспективи має застосування різання вибухом. У цьому випадку найперспективнішим є застосування лінійних зарядів, що забезпечують безуламкове різання. Заряди повинні бути закладені в заданих місцях ще на Землі. При виконанні зварювання та різання вибухом на космічному кораблі треба весь час компенсувати виникаючі при вибуху реактивні сили, що порушують траєкторію польоту корабля. Це може бути великими труднощами, що знецінюють ефективність застосування цього дешевого та надійного способу зварювання та різання в космосі. Сказане не стосується робіт зі зварювання та різання вибухом на інших планетах. Ми вважаємо, що зварювання та безуламкове різання вибухом отримає суттєвий розвиток в космосі.

Зварювання з використанням сонячної енергії. У космосі може бути використана зварювальна геліоустановка, що концентрує світлову енергію Сонця на зварюваний метал. Можлива оптична схе-

ма установки описується наступним чином. Світло падає на параболічне дзеркало великого діаметру (концентратор) і збирається в його фокусі. Окулярне дзеркало розміщується таким чином, щоб його фокус і фокус концентратора співпадали. При цьому промені від окулярного дзеркала будуть йти паралельним пучком. Для їх виведення у центрі концентратора робиться отвір. Два плоских дзеркала спрямовують промені від окулярного дзеркала на лінзу, у фокусі якої розміщується зварюваний зразок. Дзеркала повинні весь час автоматично розміщуватись так, щоб при всіх переміщеннях концентратора та лінзи їх оптичні осі співпадали після заломлення на концентраторі та дзеркалах. Для того, щоб отримати потужність геліоустановки 3 кВт, потрібно застосувати концентратор діаметром 200 см. При цьому загальна вага всіх оптичних деталей складає ~15...20 кг. Ще стільки ж будуть важити механічні вузли установки. Розглянута установка повинна мати досить складну оптичну схему, щоб забезпечити мобільність лінзи при зварюванні. Наявність великої кількості відбиваючих елементів знижує потужність установки та щільність енергії у плямі. Для установки необхідно мати джерело електроенергії, яке забезпечує живлення системи стеження за Сонцем і системи автоматичного переміщення плоских дзеркал. Ми вважаємо, що геліоустановки не отримають розповсюдження для зварювання на орбіті внаслідок своєї громіздкості та малої мобільності. Разом з тим, необхідно серйозно опрацювати питання про доцільність застосування геліоустановок для плавлення особливо чистих тугоплавких металів та їх сплавів у космічних умовах.

На основі викладеного перелічимо способи зварювання та різання, які, на нашу думку, можуть ефективно використовуватись в космосі: — ЕПЗ та різання; плазменно-дугове зварювання та різання, включаючи застосування голкоподібної мікроплазми; дугове зварювання плавким електродом малого діаметра; точкове зварювання малогабаритними кліщами із вбудованими трансформаторами; холодне зварювання; зварювання та різання вибухом.

Деякі результати дослідної перевірки різних способів зварювання та різання в умовах, що імітують космічні. Для проведення технологічних випробувань процесів зварювання та різання різних металів і сплавів в умовах, що імітують космічний простір, було розроблено комплекс обладнання. Це обладнання дозволило виконати процеси зварювання у вакуумі при динамічній невагомості.

Спеціальна вакуумна система забезпечила створення та підтримку в робочій камері зварювальної установки необхідного розрідження без

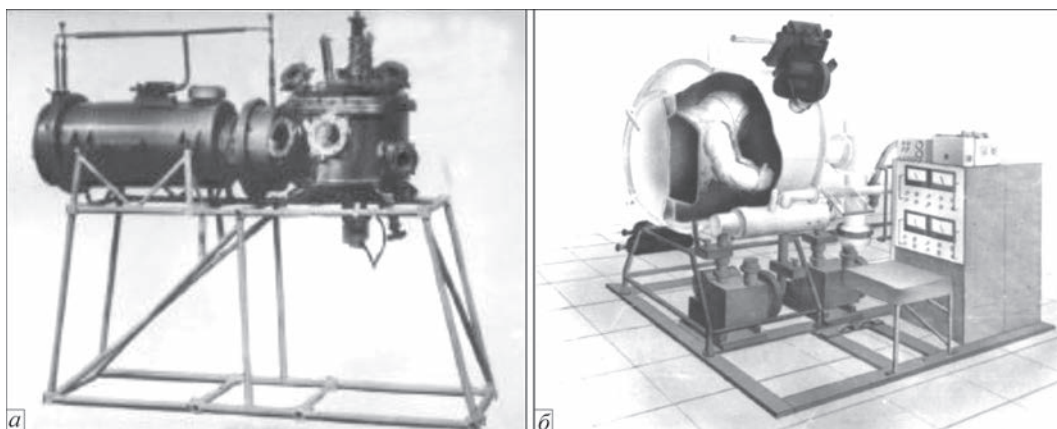


Рис. 5. Обладнання для проведення досліджень процесів зварювання в умовах, що імітують космічні: *а* — загальний вигляд універсального вакуумно-температурного стенду для вивчення зварювальних процесів; *б* — стенд-тренажер для зварювальних робіт

парів мастила. Основу цієї системи склав спеціальний високовакуумний сорбційний насос.

Дослідні зварювання проводились у вакуумній камері з нержавіючої сталі об'ємом 100 л. Всередині камери розміщено поворотний стіл з укріпленнями на ньому зразками. Зразки виготовляються в вигляді кілець, окремі сегменти яких можуть бути зроблені з різних металів. На верхній кришці камери встановлювались пристрої для зварювання різними способами. У корпусі камери є три люки, на фланцях яких встановлено три кінокамери з частотою кінокадрів 24 в секунду і 5000 в секунду.

У процесі проведення досліджень знімалися і записувалися наступні параметри: величина ва-

кууму в камері, величина перенавантажень, електричні режими зварювання та різання, час.

Загальний вигляд установки для вивчення зварювальних процесів в умовах, що імітують космічні, наведено на рис. 5, *а*. Стенд-тренажер для зварювальних робіт в умовах космосу наведено на рис. 5, *б*. Робочу камеру пристосовано для установки різних джерел нагріву для виконання наступних способів зварювання: електронно-променевого; плазмово-дугового; дугового плавким електродом.

Установки було змонтовано в летаючій лабораторії (рис. 6, 7), де забезпечувалась динамічна невагомість (0...0,15 g) при польоті літака за кривою Кеплера (рис. 8). Слід зазначити, що при переході від горизонтального польоту, при якому перенавантаження дорівнюють одиниці, до режиму невагомість, при якому перенавантаження дорівнюють нулю, а потім знову до горизонтального польоту, мав місце перехідний процес, при якому перенавантаження склали 2,2...2,5 g. У цих перехідних режимах також здійснювались зварювання та зйомка.

Під час польоту кожна установка обслуговувалась двома операторами-зварниками. Після польоту виконувались огляд і обробка зварених зразків і осцилограм, продивлялися кадри кінозйомки. У

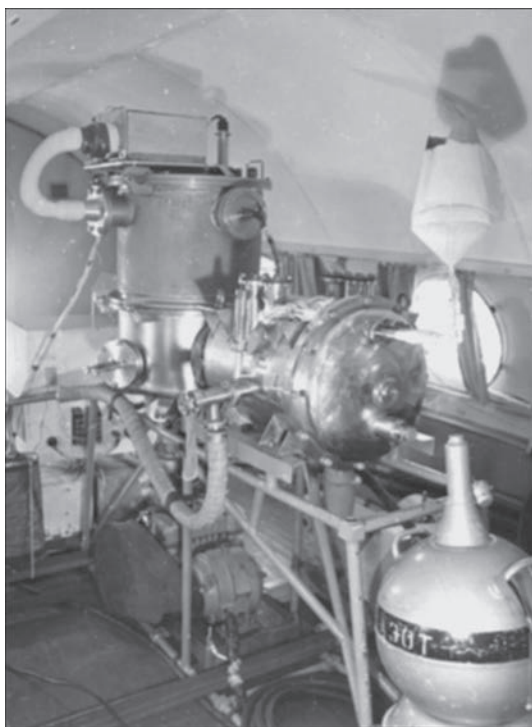


Рис. 6. Установки для проведення робіт з ЕПЗ, що змонтовано в летаючій лабораторії

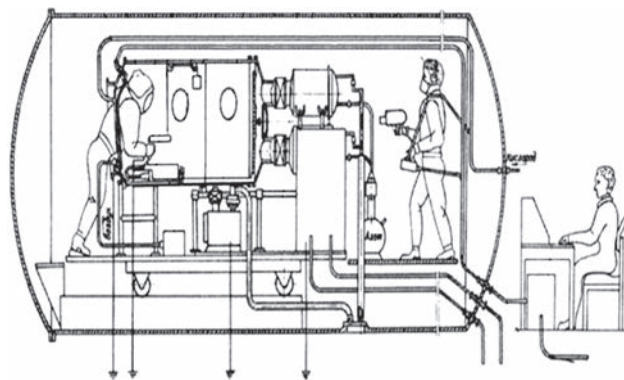


Рис. 7. Схема розміщення обладнання та зварників-дослідників у летаючій лабораторії при проведенні експериментів з ЕПЗ

результаті спостережень у польоті і записів у бортовому журналі, а також аналізу отриманих матеріалів вносились необхідні зміни в програму наступного польоту.

Метою проведених випробувань було: дослідна перевірка можливості проведення різних способів зварювання та різання металів в умовах невагомості та вакууму; перевірка технологічної надійності та роботоздатності власне способу зварювання та розробленої для його виконання малогабаритної апаратури; металографічні дослідження зварюваних зразків; дослідження особливостей формування зварних швів, утворення зварювальної ванни та перенесення металу в процесі зварювання в умовах невагомості; дослідження впливу невагомості на процес виділення газів з рідкого металу зварювальної ванни.

Наведемо короткі результати виконаних досліджень.

Електронно-променево зварювання та різання.

Зварювання та різання різних металів виконувалось при постійній потужності пучка 1 кВт, струмі променя 70 А і швидкості зварювання (різання) 30 м/год. За час перебування в невагомості (25...30 с) зварювався або розрізався один зразок. Перед польотом на Землі виконувалось зварювання контрольного зразка. При візуальному спостереженні за ходом ЕПЗ та різання в умовах невагомості та перенавантажень не встановлено зовнішніх відмінностей процесу у порівнянні зі зварюванням у звичайних земних умовах. На рис. 9 наведено мікроструктури зварних з'єднань (за відбортовкою) з нержавіючої сталі типу 12Х18Н9Т, які виконано у звичайних умовах і в не-

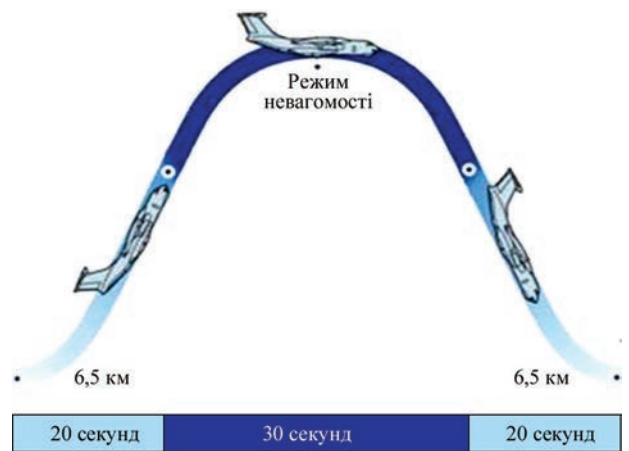


Рис. 8. Політ літаючої лабораторії на базі літака ІЛ-76МДК по параболі Кеплера для створення умов короткочасної мікрогравітації

вагомості. У результаті металографічних досліджень встановлено повну ідентичність формі шва та величини проплавлення металу як у звичайних умовах, так і в невагомості.

На рис. 10 наведено зварні стикові з'єднання з різних сплавів, які отримано в умовах невагомості у відкритому космосі.

На зразках з алюмінієвого сплаву АМГ-6, що зварені в невагомості, помічено більшу пористість у порівнянні зі швом, який виконано у звичайних умовах, що, ймовірно, пояснюється утрудненим виділенням бульбашок газу з рідкого металу зварювальної ванни.

Процес електронно-променевого різання сталі 12Х18Н9Т у невагомості та у звичайних умовах не має суттєвих відмінностей (рис. 11). При різанні

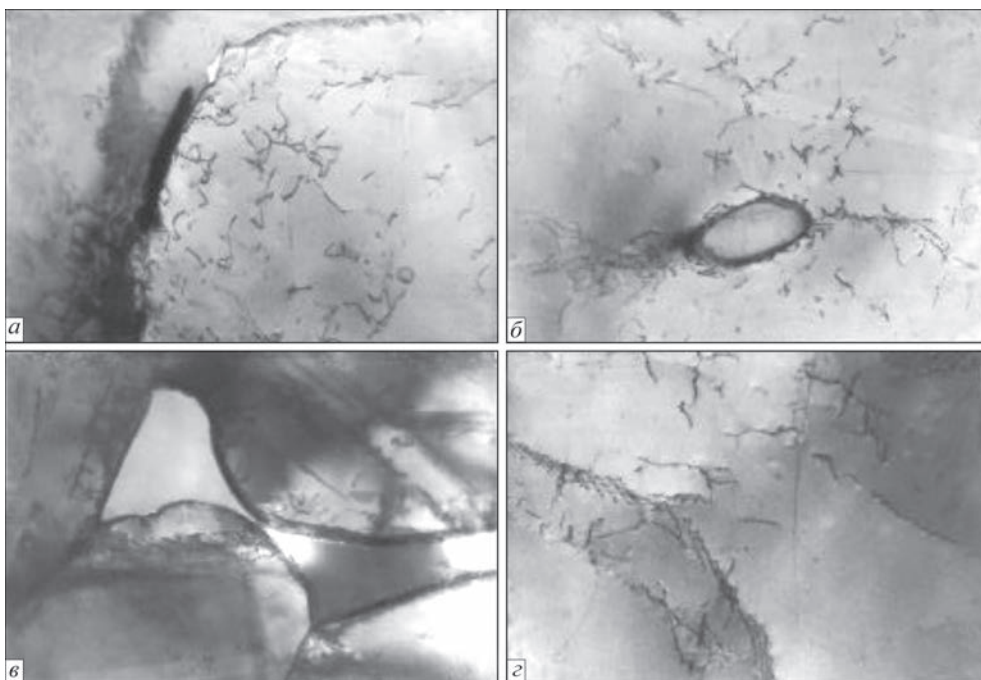


Рис. 9. Мікроструктури зварних з'єднань з нержавіючої сталі типу 12Х18Н9Т, які виконано у звичайних умовах (а, б) і в невагомості (в, г) (отримані на електронному мікроскопі)

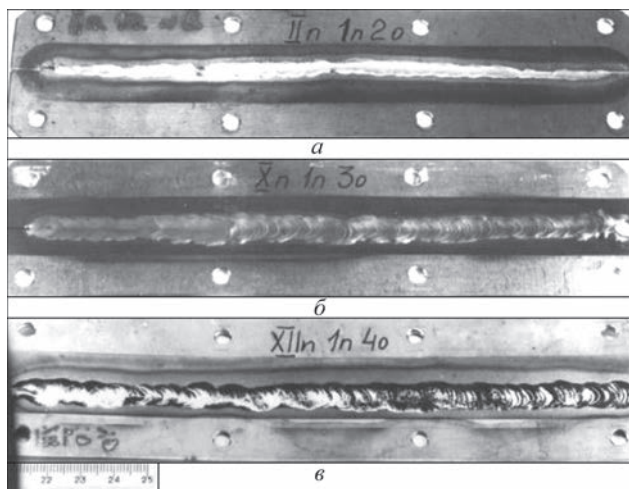


Рис. 10. Приклади з'єднань, які отримано в умовах невагомості у відкритому космосі: *a* — нержавіюча сталь, $\delta = 1$ мм, пайка ПСД-72; *b* — нержавіюча сталь, $\delta = 2$ мм, стик без проміжку з подачею присадного дроту; *c* — титан, $\delta = 1$ мм, накладне з'єднання без подачі присадного дроту

сплаву АМГ-6 на одній зі сторін різу було отримано неперервний гладкий наплив металу.

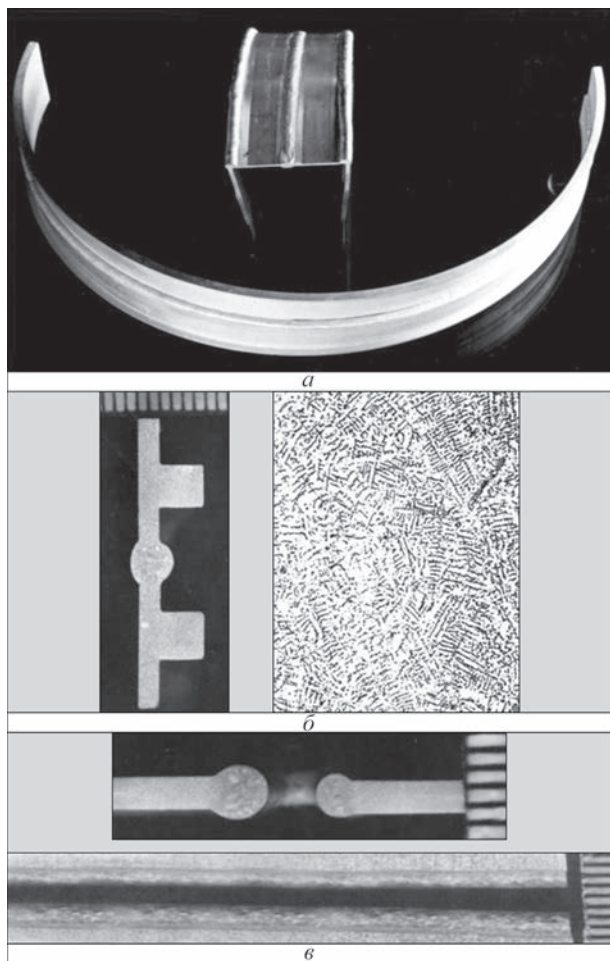


Рис. 11. Макро- та мікроструктура зварних з'єднань та різів різних металів, які виконано електронним променем у невагомості: *a* — зварні з'єднання з перекриттям з титанового сплаву ВТ1; *b* — макро- та мікроструктура зварних швів зі сталі Х18Н10Т; *c* — макроструктура та зовнішній вигляд зразків з алюмінієвого сплаву АМГ6 після різання

На основі проведених дослідів з ЕПЗ встановлено, що цей процес дозволяє в умовах короткочасної невагомості отримати якісні зварні з'єднання різних металів і сплавів. Процес електронно-променевого різання також протікає без помітних змін у порівнянні зі звичайними земними умовами. Необхідно в подальшому провести дослідження з ЕПЗ і різання в глибокому вакуумі ($10^{-10} \dots 10^{-12}$ мм рт. ст), коли можливе порушення компенсації просторового заряду в пучку з-за нестачі позитивних іонів газу. Розроблена малогабаритна апаратура для ЕПЗ і різання може бути використана в космічних умовах.

Випаровування металу з розливу за допомогою електронно-променевого нагріву. Випаровування металів та інших речовин у вакуумі широко застосовується для отримання плівок і покриттів. Перспективним є зварювання напиленням, що полягає у спрямованому інтенсивному випаровуванні металу замість з'єднання деталей і вузлів. Цей процес, мабуть, може знайти застосування для ремонтних робіт у космосі.

Найбільший інтерес представляла перевірка поведінки розплавленого металу в невагомості. Крім того, необхідно було перевірити можливість отримання напилених шарів на різних підкладках. Фізико-хімічні властивості напилених шарів залежать від ступеня розрідження, температури підкладки, властивостей матеріалу, що напилюється, кута осадження атомів на підкладку та низки інших факторів.

Враховуючи обмеження ваги установки, на якій проводився дослід, було обрано тігельний спосіб випаровування. При цьому можна створити досить велику ванну розплаву з розвиненою поверхнею, забезпечуючи тим самим вищу швидкість випаровування та візуальний контроль можливих змін у поведінці рідкого металу.

Дослід проводився за схемою, наведеною на рис. 12. Використовувалась зварювальна електронна гармата, що формувала пучок потужністю 1 кВт ($U_{\text{приск.}} = 14 \dots 15$ кВ). Тігель з металом, що напилюється, у кількості 10...20 г укріплювався на зварювальному столі. Позитивний потенціал відносно катода гармати подавався на масу розплаву через молібденовий струмопідвод $d = 4$ мм, який вставлено в дно тігля по його осі. Тігель було виготовлено з високотемпературної кераміки типу БНЦ. З тігля в процесі дослідів випаровувались алюміній та мідь.

При розплавленні в умовах горизонтального польоту і перенавантажень ($g_n \geq g$) дякуючи хорошему змочуванню матеріалу тігля розплавленим алюмінієм

поверхня розплаву має вогнутий меніск. Перед самим входом у стан невагомості ($g_n = 0 \pm 0,15 g$) джерело нагріву було вимкнено. У стані невагомості рідкий алюміній розподілювався по поверхні тігля, створюючи воронку (рис. 12).

До перенавантажень розплавлена мідь не змочувала тігель. У момент появи перенавантажень відбулося невелике зниження меніску. При настанні стану невагомості розплав піднявся з тігля, набув форми кулі та почав повільно підніматися вгору, обійшовши анод гармати. При виході зі стану невагомості розплавлений метал прилип до аноду гармати. При перенавантаженні $g_n \approx 0,15g$ частина металу, що знаходилась ще в рідкому стані, впала на зварювальний стол установки, а потім і в тігель. Напилення проводилось на підкладці з алюмінія, лавсанової і поліетилентерофтолатної плівки. Послідовно, з інтервалом у 10 хв., на вказані підкладки розпилялися алюміній, мідь і знову алюміній.

Проведені дослідження дозволили зробити наступні висновки. Пари алюмінія та міді можуть успішно конденсуватися в умовах невагомості на різні підкладки; поведінка розплавлених міді та алюмінію в умовах невагомості викликає необхідність проведення подальших досліджень, розробки спеціального обладнання та вибору оптимального способу випаровування. Отримано задовільне зчеплення металів, що напилюються, з підкладками з лавсану та поліетилентерофтолатної плівки. Відсутність підігріву підкладки з алюмінієвого сплаву АМГ-6 не дозволила отримати задовільне зчеплення конденсованої плівки з підкладкою. Показано принципову можливість виконання зварювання напиленням металу, що випаровується, при умові відповідного підігріву поверхні металу, що зварюється.

Плазмово-дугове зварювання та різання. Проведення дослідів мало на меті наступне: встановити вплив невагомості на робочий режим плазмової дуги в штучному вакуумі; визначити вплив зміни сили тяжіння на поведінку ванни рідкого металу і формування зварного шва; вивчити умови газовиділення та структурні зміни в металі шва; перевірити роботоздатність зварювального обладнання та технологічну надійність процесу.

Зварювальний пальник, що застосовувався при дослідях, наведено на рис. 13. Катодна частина пальника призначена для кріплення катоду до вакуумного вводу, а також для ізоляції катодної області дугового розряду від вакуумованого об'єму. Пальник працює без водяного або будь-якого іншого охолодження. Натікач являє собою пристрій для точного дозування плазموутворюючого газу та складається з запірної клапану і дозуючого венти-

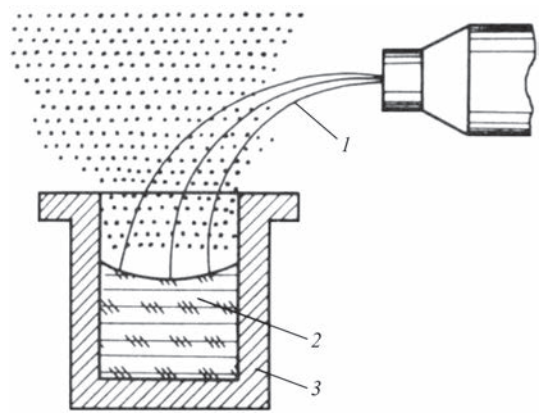


Рис. 12. Технологічний процес нанесення покриття випаровуванням у вакуумі зі скануванням електронного пучка за заданою програмою: 1 — пучок електронів; 2 — розплавлений метал; 3 — тігель

ля. За допомогою натікача в зону дуги подається аргон у кількості 0,001...0,005 л/хв. Підпалювач-пристрій для збудження дугового розряду у вакуумі являє собою генератор уніполярних імпульсів високої напруги з крутим фронтом імпульсу. Джерелом живлення дуги є акумуляторна батарея.

Для проведення дослідів використовувались колоподібні зразки з наступними типами зварних з'єднань: стикові, відбортовка, накладні. Крім того, застосовувались спеціальні зразки для різання. Зразки завтовшки 1 мм зі стиковим і накладними з'єднаннями виготовлялись з титанового сплаву ВТ-1, а з відбортовкою — з нержавіючої сталі 12Х18Н9Т. Зварювання кожного зразка відбувалось таким чином, що на ньому були ділянки зварного шва, які відповідали всім еволюціям польоту.

На підставі проведених дослідів встановлено наступне: в умовах динамічної невагомості можна отримати цілком якісні з'єднання всіх типів при відсутності проміжків у випадку накладного з'єднання та при наявності проміжків, що не перевищують 10 % товщини зварюваного металу для бортового і стикового з'єднань. У всіх випадках режими зварювання були наступними: $I_d = 43...50 A$, $U_d = 26...27 V$.

При номінальній довжині дуги 5 мм її коливання на $\pm 20\%$ помітно не впливають на якість зварного з'єднання. Витрата плазموутворюючого газу повинна точно дозуватися, і його витікання повинно бути стабільним.

Потужності плазмової дуги в 1 кВт виявилось недостатньо, щоб задовільно виконати різання сталі 12Х18Н9Т завтовшки 1 мм. Вдалося задовільно розрізати титан завтовшки 1 мм; проте поверхня різку має напливи, що утворюються незалежно від величини сили тяжіння.

При зварюванні плазмовою дугою розміри зварювальної ванночки настільки малі, що формування



Рис. 13. Ручний інструмент для плазмово-дугового зварювання та різання у космосі

зварних швів не залежить від сил гравітації та визначається в основному силами поверхневого натягу.

У зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі пори відсутні. У з'єднаннях зі сплаву ВТ-1 мали місце пори, в основному по лінії сплавлення. Мабуть, для зварювання в космосі потрібно пред'являти підвищені вимоги до чистоти основного металу.

Природний глибокий вакуум космічного простору може суттєво впливати на характер запалення дуги, порушити стійкість її горіння та фокусування анодної плями. Ці фактори в поєднанні з тривалим впливом невагомості можуть значно впливати на характер формування зварних швів та їх фізико-механічні властивості. Тому остаточний висновок про придатність і області застосування плазмово-дугового зварювання та різання в космосі можна буде зробити тільки після проведення натурних випробувань.

Дугове зварювання плавким електродом. Досліди з дугового зварювання плавким електродом в умовах динамічної невагомості проводились в камері з контролюємою атмосферою та у вакуумній камері. Досліджувався вплив сили тяжіння на: процес утворення краплі металу на торці електрода; формування



Рис. 14. Зварювальний інструмент для дугового зварювання плавким електродом

зварювальної ванни; умови виділення газів зі зварювальної ванни; швидкість плавлення електрода.

У першій серії дослідів герметична камера заповнювалась аргоном. Застосування аргону в якості іонізуємого та захисного газу має великий науковий і практичний інтерес, тому що аргон може бути використаний при виконанні зварювальних робіт всередині космічних кораблів, а також і безпосередньо в космосі при використанні місцевих накидних камер, що заповнені аргоном.

Загальний вигляд зварювального інструмента для дугового зварювання плавким електродом наведено на рис. 14.

Зварювались зразки з нержавіючої сталі марки 12Х18Н9Т, алюмінієво-магнієвого сплаву АМГ-6 і титанового сплаву ВТ-1. Товщина зразків 1 мм, з'єднання: стикові, накладні, відбортовка. Проводилось також наплавлення валиків на пластинки. Матеріал електродного дроту відповідав матеріалу зразків, діаметр дроту 1 мм. Живлення дуги проводилось від акумуляторної батареї, у зварювальний ланцюг вводився дросель з індуктивністю 0,3 мГн. Полярність — зворотня. Зміна струму дуги відбувалась шляхом зміни швидкості подачі дроту, напруги на дузі — зміною напруги холостого ходу акумуляторної батареї. У всіх випадках потужність дуги не перевищувала 1 кВт.

Процес плавлення та перенесення електродного металу, а також поведінки зварювальної ванни в умовах невагомості, нормальної сили тяжіння та перенавантажень фільмувався швидкісною кінокамерою СКС-1М і кінокамерою АКС-2. Режими зварювання осцилографувалися синхронно з кінозйомкою.

Обрані режими зварювання перевірялись безпосередньо перед кожним польотом у летаючій лабораторії на Землі, а потім вже відтворювалися при польотах в умовах перенавантажень і невагомості.

Вивчення кіноплівок і зварних зразків показало, що стан динамічної невагомості порушує співвідношення сил, що діють на краплі розплавленого металу та рідку зварювальну ванну, в результаті чого змінюється характер плавлення та перенесення електродного металу і формування зварювальної ванни. Протягом 10 польотів було зварено 36 зразків і зафільмовано більше ніж 500 м плівки швидкісною кінокамерою та близько 1000 м плівки камерою АКС-2.

Особливості плавлення та перенесення металу в невагомості. Розрахунки доводять, що для сталюого електрода діаметром 1 мм в умовах нормальної сили тяжіння, сила струму, при якій зусилля пінч-ефекту починає сприяти відриву краплі, дорівнює 32 А. Дія електромагнітної сили проявляється повною мірою і в умовах невагомості. Реактивний тиск парів металу при розташуванні

активної плями строго по осі електрода буде сприяти утриманню краплі на торці електрода. Якщо розташування активної плями зміщується з осі, то може виникнути тангенційна сила, що сприяє зрізанню краплі. У випадку зварювання на зворотній полярності в аргоні при нормальній силі тяжіння реактивний тиск парів металу невеликий.

Дослідження процесу кипіння рідин в умовах зниженої гравітації показали, що швидкість підйому бульбашок при бульбашковому кипінні різко зменшується при зниженні сили тяжіння, а їх діаметр зростає пропорційно до інтенсивності гравітаційного поля у ступені $1/3,5$. Характер плівкового та бульбашкового кипіння при невагомості є однаковим. Впливом на процес перенесення металу реактивного тиску паров металу та газових потоків у наших дослідках можна знехтувати.

Зі зменшенням сили тяжіння все більше значення набуває сила поверхневого натягнення та сили змочування. При цьому все більший вплив на характер плавлення та перенесення металу надають різні випадкові імпульси. Обробка результатів дослідів показала, що після запалювання дуги починається оплавлення електрода, на його торці утворюється крапля рідкого металу. Розмір краплі в основному визначається співвідношенням сили поверхневого натягнення та електромагнітної сили (у випадку вільного зростання краплі), а також довжиною дугового проміжка (утруднене зростання краплі).

При невеликих значеннях величини струму крапля зростає до дуже великих розмірів, що у декілька разів перевищують діаметр електрода (рис. 15). На Землі краплі таких розмірів на кінці електрода отримати неможливо. Форма крапель, як правило, є сферичною, що свідчить про відсутність будь-яких інших сил. Випадкові імпульси призводять до контакту краплі з виробом, у результаті різко зростає сила струму, зростає електромагнітне зусилля і крапля відривається. При відсутності випадкових впливів крапля знаходиться на кінці електрода тривалий час і досягає дуже великих розмірів. В окремих дослідках протягом всього періоду зйомки, що тривала більше за 3 с, не спостерігалось жодного переходу краплі. У таблиці наведено дані про розміри крапель, що вільно зростають на кінці електрода в невагомості, для матеріалів з різним поверхневим натягненням.

На кіноплівці видно інтенсивне обертання краплі навколо осі, що є перпендикулярною або нахиленою до осі електрода. Зі зростанням краплі знижується щільність струму в активній плямі на електроді та стійкість дугового розряду. Плями дуги безладно переміщуються поверхнею краплі

Матеріал	Струм дуги, А	Максимальний розмір вільно-зростаючої краплі, мм
12X18K9T	50	6...8
BT-1	60	4...5
АМГ-6	60	3...4

та ванни, глибина проплавлення основного металу зменшується, формування шва погіршується.

Збільшення сили струму за рахунок збільшення швидкості подачі електрода веде до скорочення дугового проміжку, вільне зростання краплі утруднюється, розмір крапель зменшується. Покращуючи формування шва, перенесення металу відбувається з короткими замиканнями дугового проміжка.

Зі зростанням струму дуги частота переходу крапель зростає. Так, наприклад, при зварюванні нержавіючої сталі збільшення струму від 50 до 70 А призводить до зростання частоти від 15 до 33 крапель за секунду.

Зі збільшенням сили тяжіння (на ділянках перенавантажень) підвищується частота переходу крапель електродного металу, зменшується їх розмір, стійкість горіння дуги при цьому не порушується.

Вплив невагомості на процес утворення та перенесення крапель електродного металу при зварюванні сплаву АМГ-6 має той же характер, що і при зварюванні нержавіючої сталі. Крапля весь час займає положення, що є співвісним з електродом, та має форму кулі. Після відриву краплі на кінці електрода практично не залишається рідкого металу. Збільшення сили тяжіння призводило до зростання частоти переходу крапель рідкого металу в зварювальну ванну.

Зварювання сплаву BT-1 проводилось при великих силах струму. Тому розмір крапель мало відрізняється від звичайних для земних умов. Перехід крапель через дуговий проміжок відбувається під час коротких замикань, чому в значній мірі сприяє вельми рухома зварювальна ванна. Як

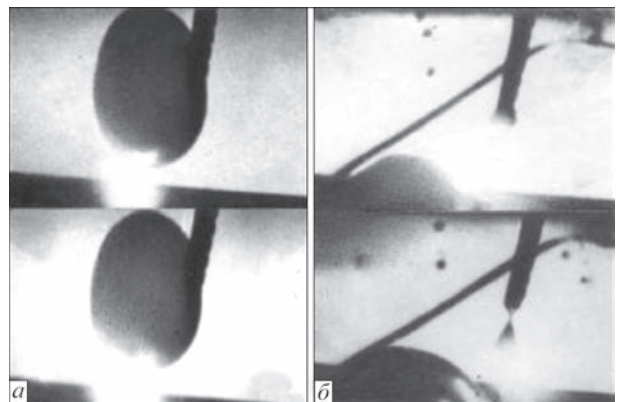


Рис. 15. Перенесення електродного металу при дуговому зварюванні електродом, що плавиться в невагомості (захисний газ аргон), зварювальний струм 50 А, напруга дуги 15 В, швидкість подачі дроту 180 м/год, діаметр електрода 0,8 мм): а — неконтрольоване, б — контрольоване

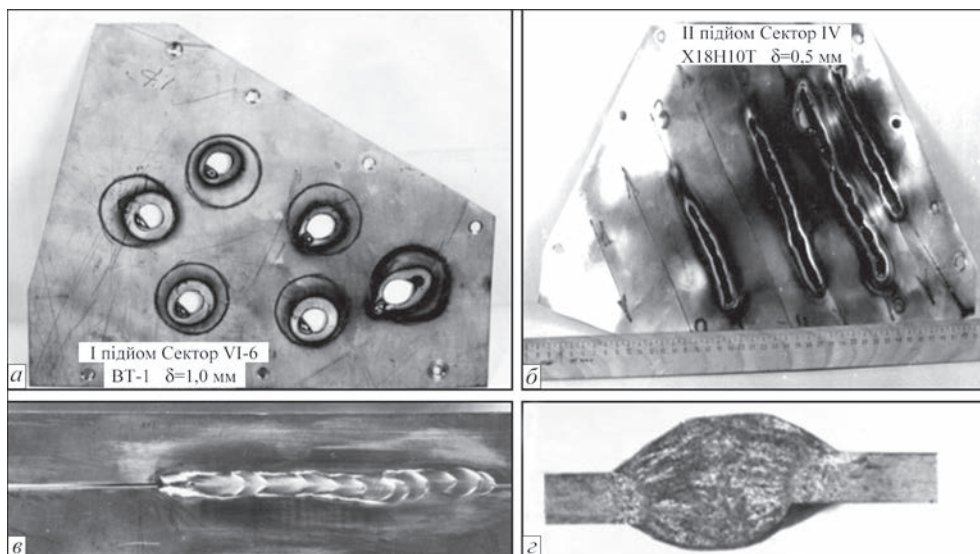


Рис. 16. Комплексні випробування в барокамері зразків з різних металів, які отримані електронно-променевим зварюванням: а — пропал, сплав ВТ-1, $\delta = 1,0$ мм; б — різання, нержавіюча сталь X18H10T, $\delta = 0,5$ мм; в — зовнішній вигляд зварного шва з нержавіючої сталі X18H10T; г — макрошліф зварного з'єднання з нержавіючої сталі X18H10T

правило, спостерігається лише частковий перехід електродного металу у ванну, більша його частина залишається на електроді, що викликає серію коротких замикань.

Вплив коливань електроду. В умовах невагомості при зварюванні на невеликих струмах випадкові імпульси значно впливають на характер перенесення металу та формування швів. З метою управління перенесенням металу було проведено дослідження впливу коливань електроду на перенесення металу. Коливання впоперек шва з амплітудою 1,5...2 мм і частотою 20 коливань за секунду здійснювались за допомогою вібратора. Коливання електроду збільшують вірогідність коротких замикань краплі на торці електрода з ванною та частоту переходу крапель. Аналіз киноплівок і зварних з'єднань показує, що описані коливання несуттєво впливають на перенесення електродного металу в невагомості.

Вплив імпульсів струму. Дослідження впливу імпульсів струму було проведено в умовах динамічної невагомості при зварюванні нержавіючої сталі. Частота імпульсів 40 Гц. Досліди з накладанням імпульсів струму проводились у процесі зварювання одного зразка. По досягненні стану динамічної невагомості спочатку починалось зварювання на заданому режимі без імпульсів, а потім після двох секунд на дуговий проміжок накладались імпульси. При зварюванні на режимі $I_d = 50$ А, $U_d = 15$ В діаметр крапель зменшувався від 6...8 мм до 1,0...1,5 мм, а частота їх перенесення зростала від 0,3 до 40 на секунду. Дослідження показали, що накладання імпульсів струму в умовах невагомості є дуже ефективним. За допомогою досить простих генераторів імпульсів можна ство-

рити кероване перенесення металу за будь-якою наперед заданою програмою.

Слід, однак, відзначити, що проблема переносу металу в значній мірі втрачає свою актуальність, якщо використовуються досить великі струми дуги, тобто якщо потужність дуги не обмежується. Це дозволяє здійснити процес зварювання з частими короткими замиканнями та зменшити розміри крапель.

Особливості кристалізації зварювальної ванни та формування швів. Дослідження показали, що невагомість певним чином впливає на формування зварних швів. Відсутність сили тяжіння веде до того, що під впливом сил поверхневого натягнення розплавлений метал стягується з країв шва, трохи випучуючись посередині. Форма валику шва залишається задовільною. Глибина проплавлення дещо знижується. При перенавантаженнях, навпаки, зменшується посилення валика та збільшується глибина проплавлення.

На рис. 16 наведено загальні види зварюваних зразків, що виконано на різних режимах в умовах вільного польоту, перенавантажень і невагомості.

Зміна властивостей дугового розряду та поведінка рідкого металу на електроді, що викликана невагомистю, при зварюванні на струмах 30...60 А, призводить до порушення умов прогріву металу та виділення з нього газів. У цьому випадку зварювані шви на сплаві АМГ-6 виходять пористими. Підвищення сили струму дозволяє уникнути пор. Сказане стосується зварювання в середовищі аргону при тиску 1 атм.

При зварюванні в космічному вакуумі умови різко змінюються. Суттєво змінюється кінетика виділення газів зі зварювальної ванни. З'являється необхідність стабілізації дугового розряду у вакуумі. Найпростішим методом є застосування ста-

білізуючих соленоїдів, що створюють поздовжнє магнітне поле.

Остаточне судження про придатність дугового зварювання плавким електродом може бути отримано тільки після проведення дослідів у натурних космічних умовах.

Своєчасний або навіть випереджувальний розвиток способів і спеціальної апаратури для зва-

рювання та різання в космосі повинно вплинути на конструкцію, методи збирання та монтажу, надійність і життєздатність міжпланетних кораблів і орбітальних станцій.

Редакція вдячна співробітникам відділу космічних досліджень ІЕЗ Н.В. Піскун та Є.Г. Терновому за допомогу у підготовці матеріалу статті.

Ідеї з використання різних видів зварювання в космосі, описані академіком Борисом Євгеновичем Патонем більше ніж пів століття тому, отримали розвиток у подальші роки. Опис зварювального обладнання і технологій зварювання у відкритому космосі наведено у наступних публікаціях.

1. Paton В.Е., Lapchinskii V.F. (1997) *Welding in space and related technologies*. England, Cambridge Inter. Sci. Publ.
2. (1999) *Автоматическая сварка*, **10** (Специальный выпуск, посвященный космическим технологиям).
3. Paton В.Е. et al. (1999) *Device for manual electron beam processing of materials in Space*. United States, Pat. Number: 5,869,801.
4. (2000) *Космос: технологии, материаловедение, конструкции*. Патон Б.Е. (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.
5. Зубченко Ю. В., Терновой Е. Г. (2015) Разработка новых эмиссионных систем электронно-лучевых пушек для технологических работ в условиях космоса. *Автомат. сварка*, **12**, 36 – 40.
6. Зубченко Ю.В., Терновий Є.Г. Матвійчук В.А. та ін. (2018) *Спосіб формування електронного пучка електронно-променевої гармати для зварювання та споріднених технологій в умовах відкритого космосу*. Україна, Пат. № 117397.
7. Булацев О.Р., Терновий Є.Г., Крюков В.П. та ін. (2019) *Пристрій для наклеювання плівкових покриттів для ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні космічних об'єктів у відкритому космосі*. Україна, Пат. № 137492.
8. Paton В.Е., Lobanov L.M., Naidich Y.U. et al. (2019) New electron beam gun for welding in space. *Science and Technology of Welding and Joining*, **24**(4), 320–326.
9. Lobanov L.M., Asnis E.A., Ternovy Ye.G. et al. (2021) *Some issues of repairing manned space vehicles in outer space using electron beam welding*, **315**, 101–105. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.315.10>



Зварювальне обладнання ІЕЗ під час проведення експерименту у відкритому космосі, липень 1984 р., станція «Салют-7»

ПАМ'ЯТІ К.А. ЮЩЕНКА



8 березня 2023 р. на 88-у році пішов з життя відомий вчений у галузі технології зварювання та зварювального матеріалознавства, доктор технічних наук, академік НАН України, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії СРСР, Премії РМ СРСР, Премії ім. Є.О. Патона НАН України,

лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, кавалер орденів князя Ярослава Мудрого V та IV ст., кавалер ордену Дружби народів Костянтин Андрійович Ющенко.

К.А. Ющенко народився 8 грудня 1935 р. у м. Кременчузі. Після закінчення у 1958 р. Київського політехнічного інституту і до останніх днів життя працював в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, був завідувачем відділу металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів, заступником директора з наукової роботи.

Творча діяльність ученого характеризувалася широким діапазоном науково-технічних інтересів та глибоким зацікавленням у практичному застосуванні результатів досліджень і розробок. Його роботи добре відомі не лише в Україні, а й за її межами. К.А. Ющенко був віце-президентом Міжнародного інституту зварювання, виконавчим директором київського відділення Американського міжнародного товариства з матеріалів (ASM International), членом технічного комітету та головою спеціального комітету Міжнародного інституту зварювання зі з'єднань та покриттів перспективних матеріалів у авіаційній техніці. Входив до керівного складу міжнародних організацій з криогенної техніки та криогенних матеріалів. Був керівником ряду міжнародних Європейських проектів.

Найвідоміші досягнення академіка К.А. Ющенка відносяться до теорії зварювання сталей феритно-аустенітного класу; досліджень зі створення нових конструкційних сталей, що зварюються; сплавів для криогенної техніки; розробок нових технологій з інженерії поверхні.

Понад 80 нових марок сталей, зварювальних дротів, флюсів, технологій, створених під керівництвом і за участі К.А. Ющенка, використовуються у вітчизняному криогенному машинобудуванні. Їх використання реалізовано в новітніх проектах, таких як «Буран» (стартовий комплекс), «Токамак-7», «Токамак-15» (силова надпровідна магнітна система), великі імітатори космосу, МГД-генератори, при-

строї життєзабезпечення та бортові двигуни космічних систем, нове покоління газотурбінних двигунів.

Нові матеріали, розроблені за участі К.А. Ющенка, включені як потенційні при створенні міжнародного термоядерного реактору «ІТЕР» і магнітної системи установки «Стеларатор». Розроблено і впроваджено у виробництво заводами «Дніпроспецсталь», НКМЗ і «Запоріжсталь» промисловою технологією виробництва товстолистового прокату великих поковок (масою до 20 т) зі стабільно-аустенітної сталі для будівництва прототипу реактора з керованим термоядерним синтезом.

В останні роки К.А. Ющенко зі співробітниками запропонував технологію керування сегрегаційними явищами при рекристалізації металу за рахунок контрольованого диспергування домішок в зерні. Ці роботи відкрили перспективний напрямок у розробці технологічних безнікелевих корозійностійких високохромистих феритних сталей, що дозволило запропонувати низку добре зварюваних сталей масового призначення. Одним зі значних наукових досягнень є створення теорії зварювання високолегованих сталей із понадрівноважним вмістом азоту.

Завдяки фундаментальним дослідженням розроблено науково-технологічні основи створення принципово нових просторових конструкцій з монокристалічною структурою з жароміцних нікелевих сплавів для умов електронно-променевого зварювання.

Розроблено прогресивні технології зварювання, наплавлення та ремонту поверхневих дефектів деталей авіаційних ГТД методами мікроплазмового порошкового наплавлення, реакційно-дифузійного та електронно-променевого зварювання. Серійне виробництво впроваджено на ДП «Івченко-Прогрес», ПАТ «Мотор Січ», ТОВ «Луцький ремонтний завод «Мотор» та ін.

На базі досліджень технологічних процесів отримання прецизійних швів розроблено технології зварювання типових технологічно складних деталей та вузлів лопаток, теплових труб, термоємісних перетворювачів із ODS-сплавів, наноструктурованих систем.

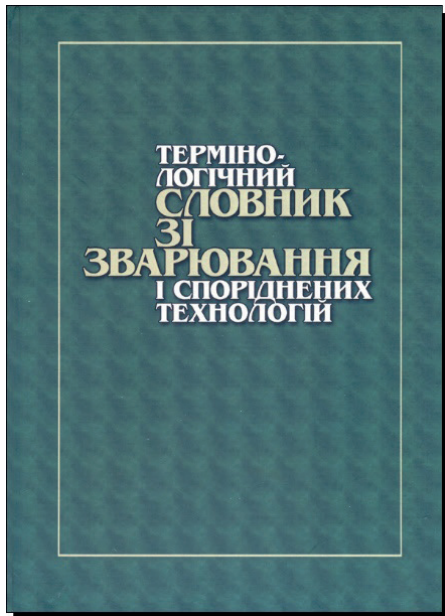
К.А. Ющенко – автор більше як 900 друкованих робіт та винаходів, серед яких 5 монографій та 1 довідник. Багато років він очолював один з провідних відділів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. Під його керівництвом підготовлено 8 докторів та понад 40 кандидатів наук.

Відхід Костянтина Андрійовича Ющенка – тяжка втрата для української науки. Світла пам'ять про цю Людину завжди буде в наших серцях, а його справа гідно продовжиться в працях його учнів.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Редколегія журналу «Автоматичне зварювання».

НОВА КНИГА

Термінологічний словник зі зварювання і споріднених технологій / Л.М. Лобанов, Ю.В. Демченко, О.К. Маковецька; за ред. Л.М. Лобанова; Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – Київ: Академперіодика, 2022. – 329 с. ISBN 978-966-360-474-9.



У термінологічному словнику українською і англійською мовами подано близько 2,5 тис. термінів зі зварювання і споріднених технологій – різання, паяння, наплавлення, склеювання, напилення, неруйнівного контролю, металургії, матеріалознавства, механіки та ін. Наведено також їх стисле визначення. Для наукових та інженерно-технічних працівників, викладачів і студентів закладів вищої та середньої спеціальної освіти, а також фахівців зварювального виробництва.

Зварювання – провідна технологія сьогодення, що широко застосовується для створення нероз’ємних з’єднань різноманітних конструкційних і функціональних (металевих, неметалевих, композиційних та органічних) матеріалів у звичайних умовах земної атмосфери, в космосі та у водному середовищі (під водою).

Про масштаби застосування зварювання свідчать дані статистики: приблизно 70 % усього виробленого в світі сталевого прокату використовується у зварних конструкціях; річний обсяг світового виробництва зварювальних матеріалів і устаткування становить десятки мільярдів доларів. У різних країнах світу у зварювальному ви-

робництві зайняті мільйони зварників, різальників, дефектоскопістів та інших фахівців.

Завдяки наполегливій праці багатьох поколінь науковців і практиків зварювання сформувалося як самостійна галузь наукового знання зі своїми предметами й методами досліджень та термінологією. Це дало змогу створити великий арсенал зварювальних і споріднених технологій (різання, паяння, наплавлення, напилення, склеювання та ін.), постійно розширювати сфери їх застосування, а зварювальному виробництву – стати однією з провідних галузей світової економіки зі сталими темпами розвитку.

Численні напрями й методи зварювання та споріднених технологій, широкий простір застосування зумовили появу і розвиток потужної терміносистеми цієї галузі наукового знання, що увібрала також поняття суміжних галузей – матеріалознавства, механіки, металургії та ін.

Упродовж тривалого часу Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України займається упорядкуванням термінології в галузі зварювання і споріднених технологій. В Інституті електрозварювання розроблено «Українсько-російський словник зварювальної термінології», «Англо-руський словарь по сварке», «Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас» та інші, які видано декількома виданнями.

Зміцнення позицій української мови як державної, видання технічних журналів і викладання в школі та закладах вищої освіти українською мовою зумовило необхідність розроблення термінологічного словника зі зварювання і споріднених технологій. Пропонований термінологічний словник містить близько 2500 сучасних термінів зі зварювання і споріднених технологій, а також суміжних галузей знань – механіки, матеріалознавства, металургії та інших – і їх стисле визначення. Терміни наведено українською та англійською мовами. Назви хімічних речовин подано за українською хімічною номенклатурою та державним стандартом.

Укладачі Термінологічного словника висловлюють щире подяку колективу Українського мовно-інформаційного центру НАН України та його керівнику академіку НАН України В.А. Широкову за плідну багаторічну співпрацю і допомогу в підготовці цього видання.

Замовлення на Термінологічний словник, а також свої зауваження і пропозиції зацікавлені користувачі можуть надсилати за адресою: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ.



Компанія Fronius представляє дві нові потужні системи відведення диму та ергономічний пальник із димовідведенням

Забезпечити максимальний захист від зварювального диму дуже важливо. І справа не лише в необхідності досягти відповідності стандартам. Цей крок свідчить, що компанія дбає про своїх зварювальників і про всіх, хто працює з ними в одному приміщенні. Тим, кому потрібне максимально ефективне рішення, компанія Fronius пропонує пальник із димовідведенням Exento і дві потужні мобільні системи відведення диму.

Перш за все слід зазначити, що нові рішення, а саме ергономічний пальник із димовідведенням Exento та компактна мобільна вакуумна система відведення диму Exento HighVac, чудово поєднуються між собою. Якщо застосовувати таку комбінацію під час зварювання MIG/MAG, утворений дим зникатиме просто миттєво. Завдяки високоякісним фільтрам високовакуумна система Exento HighVac знешкоджує понад 99,9 % захоплених частинок зварювального диму. Низьковакуумна система Exento LowVac вважається універсальною та підходить для всіх процесів зварювання, зокрема MIG/MAG, TIG і ручного зварювання стрижневим електродом. Завдяки особливій оптимізованій конструкції витяжки цей пристрій видаляє дим швидше, ніж більшість стандартних систем.

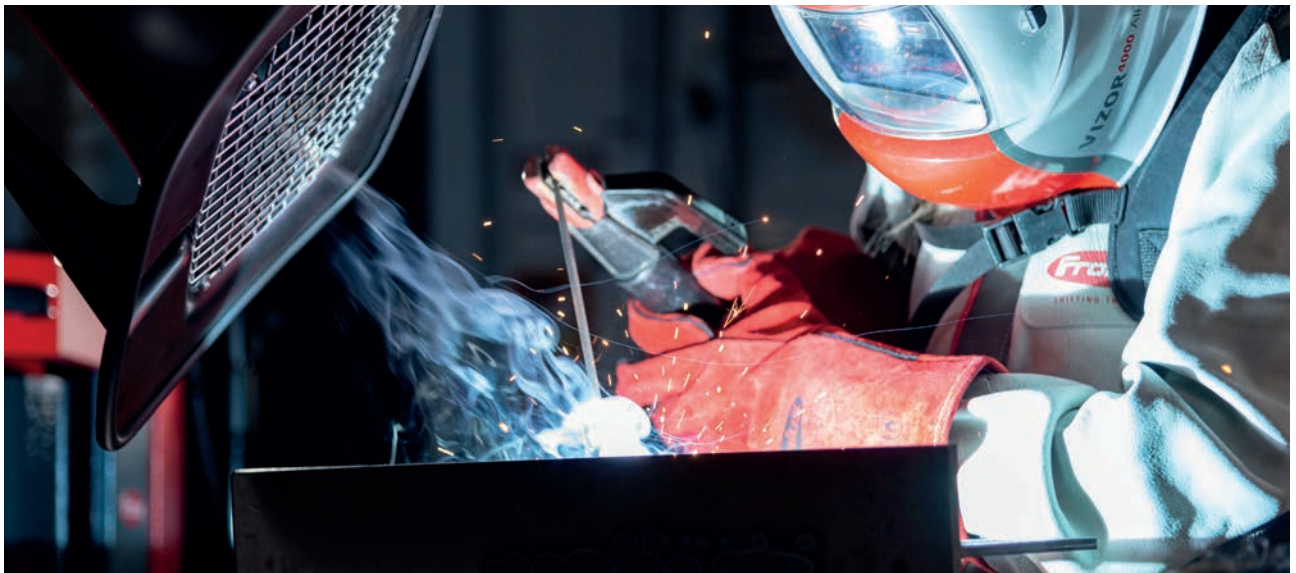
Пальник із димовідведенням Exento, створений за стандартом EN ISO 21904-1, точно та акуратно підбирає весь зварювальний дим ще до того, як той пошириться в приміщенні. Розробники приділили особливу увагу його конструкції, відтак він простий у роботі та ергономічний. До прикладу,



Злагоджений дует від одного виробника: система відведення диму Exento HighVac та ергономічний пальник із димовідведенням Exento



Зварювальний дим дуже шкодить здоров'ю. Потужні системи відведення диму, зокрема Fronius Exento HighVac, захищають від його впливу не лише самих зварювальників, але й тих, хто їх оточує.



Потужна система відведення диму Exento LowVac із гнучким рукавом здатна ефективно очищувати великі робочі площі

потужність всмоктування тепер можна регулювати безпосередньо на ручці за допомогою обвідного клапана, гумові вставки гарантують, що пальник не вислизне з рук, а світлодіодне підсвічування в стандартній комплектації полегшує роботу в темряві і допомагає контролювати якість виконання робіт. Пальник оснащено трьома типами інтерфейсу користувача, які застосовуються з урахуванням типу зварювання: верхня кнопка пальника, кулісний перемикач і система JobMaster. У поєднанні з пальником Exento нова високовакуумна система відведення показує чудові результати там, де потрібно безперервно видаляти дим та пилю. Це гнучка, потужна та універсальна машина, яку можна застосовувати будь-де завдяки невеликій площі розміщення (60x60 см) і максимальному радіусу дії (360°). Вбудований компресор із боковими вентиляційними каналами забезпечує потужність всмоктування до 170 м³ на годину, а вертикально встановлений картридж фільтра значно покращує ефективність очищення. Розробники подбали і про зручність використання, додавши широкий діапазон потужностей, які можна вибрати завчасно, та інтуїтивно зрозуміле керування одним натисканням на кнопку. А ще зварювальник може швидко вибрати потрібну програму, навіть якщо працює в рукавицях. Новий пальник із димовідведенням Exento та компактна мобільна вакуумна система відведення диму Exento HighVac чудово працюють у парі для досягнення максимального результату. Хоча за потреби цю систему можна використовувати і з іншими пальниками з димовідведенням.

Exento LowVac – гнучка, економна та компактна переносна низьковакуумна система відведен-



Фільтр Exento LowVac має велику потужність всмоктування і легко та акуратно замінюється, що теж важливо для безпеки працівників

ня диму підходить для всіх стандартних процесів зварювання MIG/MAG, TIG та MMA (ручне зварювання стрижневим електродом). Без неї не обійтися, коли застосовуються пальники без димовідведення. Систему Exento LowVac оснащено поворотною витяжкою (360°) із дросельним клапаном та, за бажанням замовника, світлодіодним підсвічуванням. Привертає увагу й велика площа замінюваного фільтра (25 м²), яку за потреби можна збільшити до 42 м². Завдяки тривкій і стійкій конструкції Exento LowVac запросто витримує постійні переміщення, якщо доводиться часто змінювати робоче місце. Крім того, система дуже економічна, що зумовлено високою потужністю та довгим терміном служби фільтра.

Fronius International GmbH — австрійська компанія з головним офісом в місті Петтенбах і відділеннями в містах Вельс, Тальхайм, Штайнхаус і Заттледт. Компанія, штат якої налічує 6100 співробітників по всьому світу, працює в галузях зварювального обладнання, фотовольтаїки та систем для заряджання акумуляторних батарей. Близько 89 % продукції компанії постачається на експорт за допомогою 36 міжнародних дочірніх компаній Fronius, а також мережі торгових партнерів і представників у більш ніж 60 країнах. Компанія Fronius пропонує інноваційні продукти та послуги, а також володіє 1366 чинними патентами, що робить її світовим лідером інновацій.