

З А В Т О М А Т И Ч Н Е З В А Р Ю В А Н Н Я 3 2022

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

НАУКА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА

Спільна навчально-наукова лабораторія зварювання та споріднених процесів.....3

МЕТАЛУРГІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

Максимов С.Ю., Кражановський Д.М., Шепелюк Ю.А., Осинська С.В. Вплив параметрів імпульсно-дугового зварювання на формування металу зварного шва та мікроструктуру зони термічного впливу сталі 09Г2С 11

Німко М.О., Скульський В.Ю., Гаєрик А.Р., Осипенко І.Г., Іваненко Т.В. Вплив режимів зварювання на знеуглецювання в зоні термічного впливу сталі Р91 в зварних з'єднаннях різномірних сталей після високого відпуску 19

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Швец В.І., Дідковський О.В., Антіпін Є.В., Зяхор І.В., Капітанчук А.М., Wang Qichen. Особливості мікроструктури з'єднань заевтектоїдної рейкової сталі марки AREAL-136HE-X при контактному-стиковому зварюванні 26

ЕЛЕКТРОШЛАКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Ланкін Ю.М., [Бондаренко О.П.], Тюкалов В.Г., Соловйов В.Г., Романова І.Ю. Експериментальне дослідження біфілярного електрошлакового зварювання із зрівняльним дротом 34

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА

Пантелеймонов Є.О. Індуктори для термічної обробки зварних стиків залізничних та трамвайних жолобчастих рейок.....38

ЕКОНОМІКА ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Лобанов Л.М., Кушнар'ов О.П., Мазур О.А., Лабур Т.М., Снегірьов І.Л., Пустовойт С.В. Економічна оптимізація методів зварювання конструкцій паливних баків ракетно-космічної техніки 42

ОХОРОНА ПРАЦІ

Левченко О.Г., Полукаров Ю.О., Безушко О.М., Гончарова О.М. Системи гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів в Україні (Частина 1)..... 53

ІНФОРМАЦІЯ

Інтелектуальне палетування. Спеціалізовані рішення для виконання будь-яких операцій від Fanuc 59

Розроблено в ІЕЗ 60

Календар березня..... 61

CONTENT

SCIENCE FOR PRODUCTION

Joint Training-Scientific Laboratory for Welding and Related Processes.....3

METALLURGY AND TECHNOLOGY OF WELDING AND SURFACING

Maksymov S. Yu., Krazhanovsky D. M., Shepelyuk Yu. A., Osynska S. V. Effect of parameters of pulse-arc welding on the formation of weld metal and microstructure of heat-affected-zone of 09G2S steel 11

Nimko M. O., Skulskii V. Yu., Gavrik A. R., Osipenko I. G. Influence of welding modes on decarburization in the haz of R91 steel in welded joints of dissimilar steels after high-temperature tempering 19

MATERIAL SCIENCE

Shvets V. I., Didkovsky O. V., Ye. V. Antipin, Zyakhor I. V., Kapitanchuk L. M., Wang Qichen. Features of microstructure of butt joints of hypereutectoid Areal-136HE-X rail steel in flash-butt welding.....26

ELECTROSLAG TECHNOLOGIES

Lankin Yu. M., [Bondarenko O. P.], Tyukalov V. G., Solovjov V. G., Romanova I. Yu. Experimental studies of bifilar electroslag welding with an equalizing wire 34

HEAT TREATMENT

Panteleimonov E. O. Inductors for heat treatment of welded butt joints of railway and tram grooved rails 38

ECONOMICS OF WELDING PRODUCTION

Lobanov L. M., Kushnar'ov O. P., Mazur O. A., Labur T. M., Snegirov I. L., Pustovoi S. V. Economic optimization of the methods of welding the structures of fuel tanks for aerospace engineering 42

OCCUPATIONAL HEALTH

Levchenko O. G., Polukarov Yu. O., Bezushko O. M., Goncharova O. M. Systems of hygienic evaluation of welding materials in Ukraine (Part 1)..... 53

INFORMATION

Intellectual palletizing. Specialized solutions for performing any operations from Fanuc..... 59

Developed by PWI..... 60

Calendar of March 61



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Засновники

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

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 2302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2022

Передплатний індекс 70031.

12 випусків на рік (видається щомісячно).

Друкована версія: 2880 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

Електронна версія: 2880 грн. за річний комплект

(випуски журналу надсилаються електронною поштою

у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера

передплатника надається доступ до архіву журналу).

Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается

англійською мовою під назвою

«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

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

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150,
11 Kazymyr Malevych Str.
Tel.: (38044) 200 2302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration

of KV 4788 dated 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Subscription 2022

Subscription index 70031.

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

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

\$144, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

Subscription is possible for previous issues for any year.

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

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

СПІЛЬНА НАВЧАЛЬНО-НАУКОВА ЛАБОРАТОРІЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ

Сучасні умови розвитку прогресивних технологій потребують інтеграції певних процесів для одержання нової якості продукції. Базовою умовою таких інтеграційних процесів є поєднання наукового досвіду дослідників, які працюють в різних наукових підрозділах над близькими задачами. Такий підхід дозволяє більш повно аналізувати та розв'язувати проблеми, що постають перед дослідниками через невідомий плин науково-технічного прогресу.

Необхідність поєднання зусиль науковців при вирішенні задач плазмового і гібридного зварювання та адитивних дугових технологій постала вже досить давно. Кілька десятиріч тому ця необхідність призвела до інтенсивного розвитку й розгалуженню діяльності Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. Проте сучасні реалії потребують пошуку нових підходів. У 2017 р. основа для їх створення була знайдена. За ініціативою Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та при підтримці академіка Б.Є. Патона п'ять науково-технічних організацій взяли участь у створенні спільної навчально-наукової лабораторії зварювання та споріднених процесів. До складу засновників увійшли:

- Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України;
- Зовнішньо-економічне представництво Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона;
- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР»;
- Корпорація «Укрспецтехнології».

Створення спільної навчально-наукової лабораторії, при підтримці академіка Б.Є. Патона, було юридично оформлено угодою про співробітництво №2500/17-0 від 13.06.2019.

Мета створення лабораторії – побудова науково-технологічної експериментальної бази колективного користування із залученням найбільш передового обладнання для проведення науково-дослідних робіт в галузях плазмових, лазерних і гібридних технологій зварювання та споріднених процесів, адитивних технологій, дифузійного зварювання та паяння.

Для досягнення цієї мети планується вирішення наступних завдань:

1. Створення нових форм науково-технічної кооперації шляхом об'єднання створення наукової експериментальної бази колективного користування із залученням сучасного обладнання для проведення науково-дослідних робіт в галузях передових технологій зварювання та споріднених процесів із використанням матеріально-технічної бази науково-дослідних, учбових та науково-виробничих організацій.

2. Залучення інвестицій, в тому числі від іноземних партнерів.



Головний корпус НТУУ КПІ імені Ігоря Сікорського



Головний корпус Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона

3. Розширення міжнародного науково-технічного співробітництва та співробітництва між науково-дослідними установами і промисловими підприємствами в Україні, залучення провідних українських та міжнародних вчених і спеціалістів до участі в науково-технічних розробках.

4. Виховання наукових кадрів, залучення студентів закладів вищої освіти України бакалаврського, магістерського та Ph-D рівнів навчання до участі в реальних науково-технічних та виробничих проектах.

В даний час структура спільної лабораторії включає дві експериментально-технологічні площадки: «Плазмового і гібридного зварювання та адитивних дугових технологій» (Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона КПІ імені Ігоря Сікорського) та «Демонстраційно-технологічна дільниця плаз-

мових, гібридних та адитивних технологій» (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР», Зовнішньо-економічне представництво Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона). Науковий керівник спільної лабораторії – чл.-кор. Національної академії наук України, д-р техн. наук професор В.М. Коржик.

В рамках Угод про співробітництво, укладених із Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вказана спільна лабораторія є базою для міжнародного науково-технічного співробітництва із Науково-дослідним інститутом зварювальних технологій в провінції Чжецзян (КНР) та Чжецзянським науково-дослідним Інститутом спеціального обладнання (КНР).

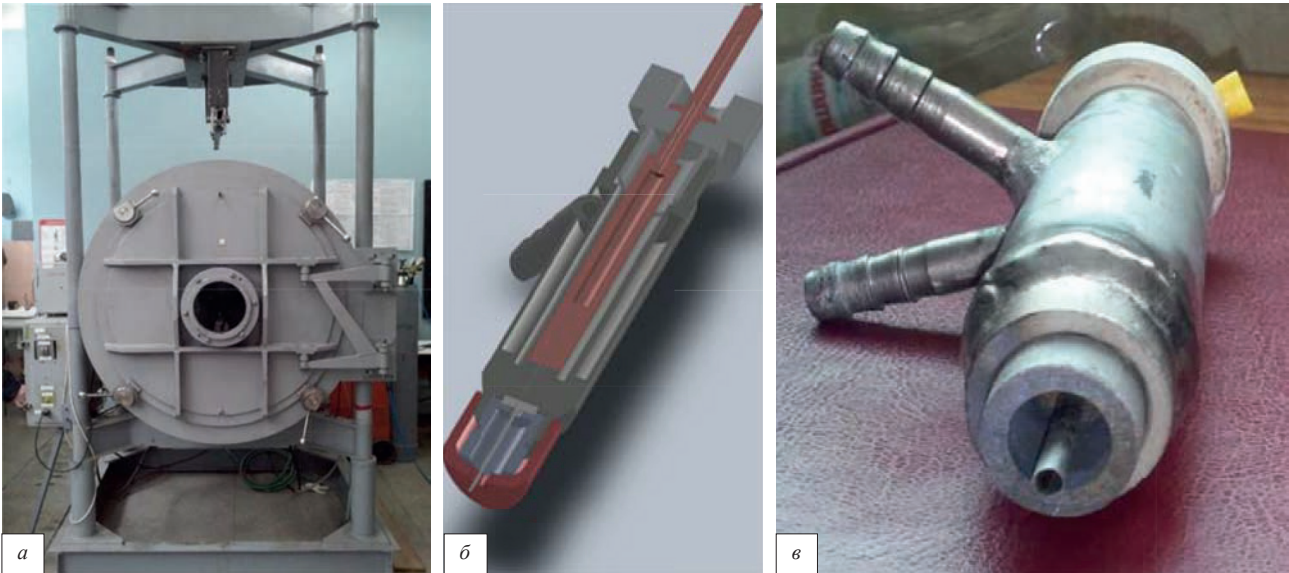


Рис.1. Зовнішній вигляд вакуумної камери (а) та плазмотрону (модель (б) і виготовлений за нею зразок (в)) для зварювання плазмово-емісійним розрядом у вакуумі



Рис.2. Головка (а) з плавким електродом для адитивного вирощування деталей із внутрішніми ребрами жорсткості (б, в)

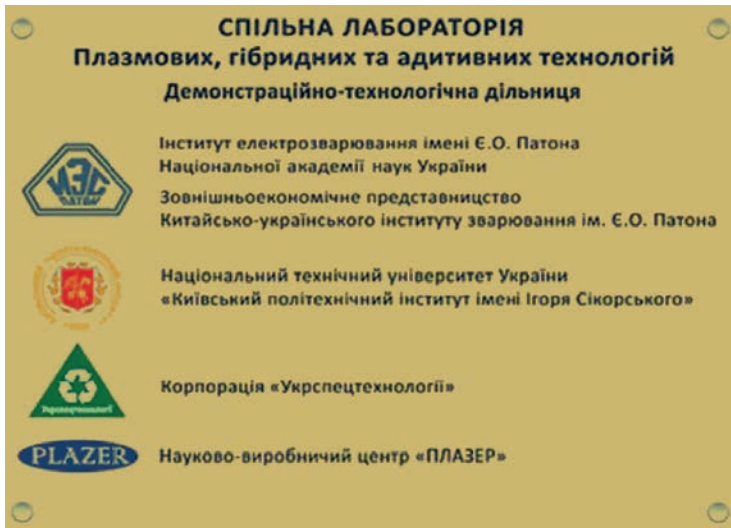


Рис. 3. Макет титульної дошки демонстраційно-технологічної дільниці та її відкриття міжнародним науково-дослідним колективом

В Лабораторії плазмового і гібридного зварювання та адитивних дугових технологій проводяться дослідження по розробці та подальшому розвитку таких прогресивних процесів, як:

- зварювання плазмово-емісійним розрядом постійним струмом прямої полярності порожнинним катодом у вакуумі;
- дифузійне зварювання у вакуумі;
- паяння у вакуумі;
- адитивне вирощування деталей за допомогою плавкого електрода.

Для виконання досліджень створено комплекси відповідного вакуумного обладнання (рис.1). Дослідження плазмово-емісійного розряду (плаз-

мо-дугового розряду з порожнинним катодом) у вакуумі довели можливість його успішного використання при зварюванні титанових сплавів товщиною до 16 мм без розробки крайок. При цьому одержані шви за якістю і продуктивністю виконання наближаються до результатів, отриманих електронно-променевим зварюванням при значно меншій собівартості.

Також в даному підрозділі спільної лабораторії досліджується адитивне вирощування деталей за допомогою плавкого електрода. Зокрема, розроблюються технології виготовлення металевих деталей складної просторової форми із внутрішніми ребрами жорсткості (рис.2).



Рис. 4. Одне з лабораторних приміщень демонстраційно-технологічної дільниці

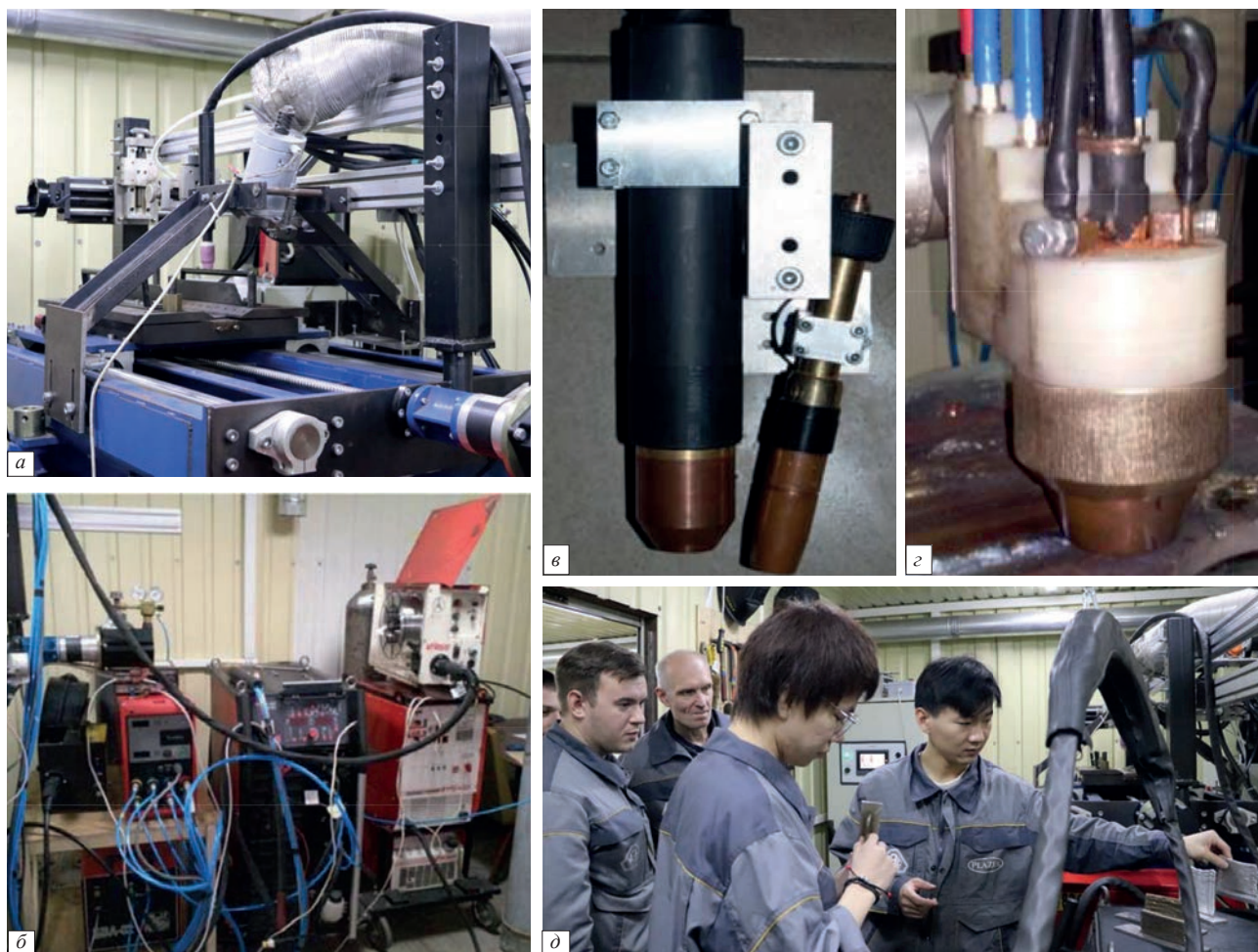


Рис. 5. Універсальний технологічний комплекс плазмово-дугових та гібридних технологій, автоматичного комбінованого і гібридного зварювання «плазма + дуга плавкого електрода»: а – маніпулятор для зварювання в різних просторових положеннях; б – зварювальне обладнання; в – моноблок комбінованого Plasma+MIG/MAG зварювання; г – плазмотрон для гібридного Plasma-MIG/MAG зварювання; д - ознайомлення з обладнанням та технологією іноземних партнерів в рамках міжнародного науково-технічного співробітництва

На Демонстраційно-технологічній дільниці плазмових, гібридних та адитивних технологій (рис.3) виконується розробка таких технологій, як:

- роботизоване шовне і точкове плазмове зварювання постійним струмом прямої полярності;
- роботизоване шовне і точкове плазмове зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих та магнієвих сплавів;
- роботизоване (автоматизоване) плазмово-порошкове наплавлення постійним струмом прямої полярності та різнополярним асиметричним струмом (для алюмінієвих та магнієвих сплавів);
- роботизоване (автоматизоване) зварювання в режимі «м'яка плазма» постійним струмом прямої полярності та різнополярним асиметричним струмом (для алюмінієвих та магнієвих сплавів);
- роботизоване (автоматизоване) зварювання та наплавлення за допомогою процесу зварювання плавким електродом із короткими замиканнями (CMT - Cold Metal Transfer);
- роботизоване (автоматизоване) аргонодугове зварювання постійним струмом прямої поляр-

ності та різнополярним асиметричним струмом (для алюмінієвих та магнієвих сплавів);

- лазерне зварювання в контрольованій атмосфері та в динамічному вакуумі;
- роботизоване (автоматизоване) лазерне різання і зварювання;
- гібридні процеси зварювання (плазма-MIG/MAG, плазма-TIG, лазер-плазма, лазер-MIG/MAG, лазер-TIG);
- гібридне лазерно-плазмово різання;
- плазмово різання на зворотній полярності металевих листів підвищених товщин;
- плазмово різання із різними типами плазмотворюючих газів і з добавкою води;
- надзвукове плазмово порошкове напилювання покриттів;
- високошвидкісне плазмово-дугове напилювання покриттів струмопровідними дротами;
- високошвидкісне електродугове дводротове напилювання покриттів із активацією вуглеводневими газами;

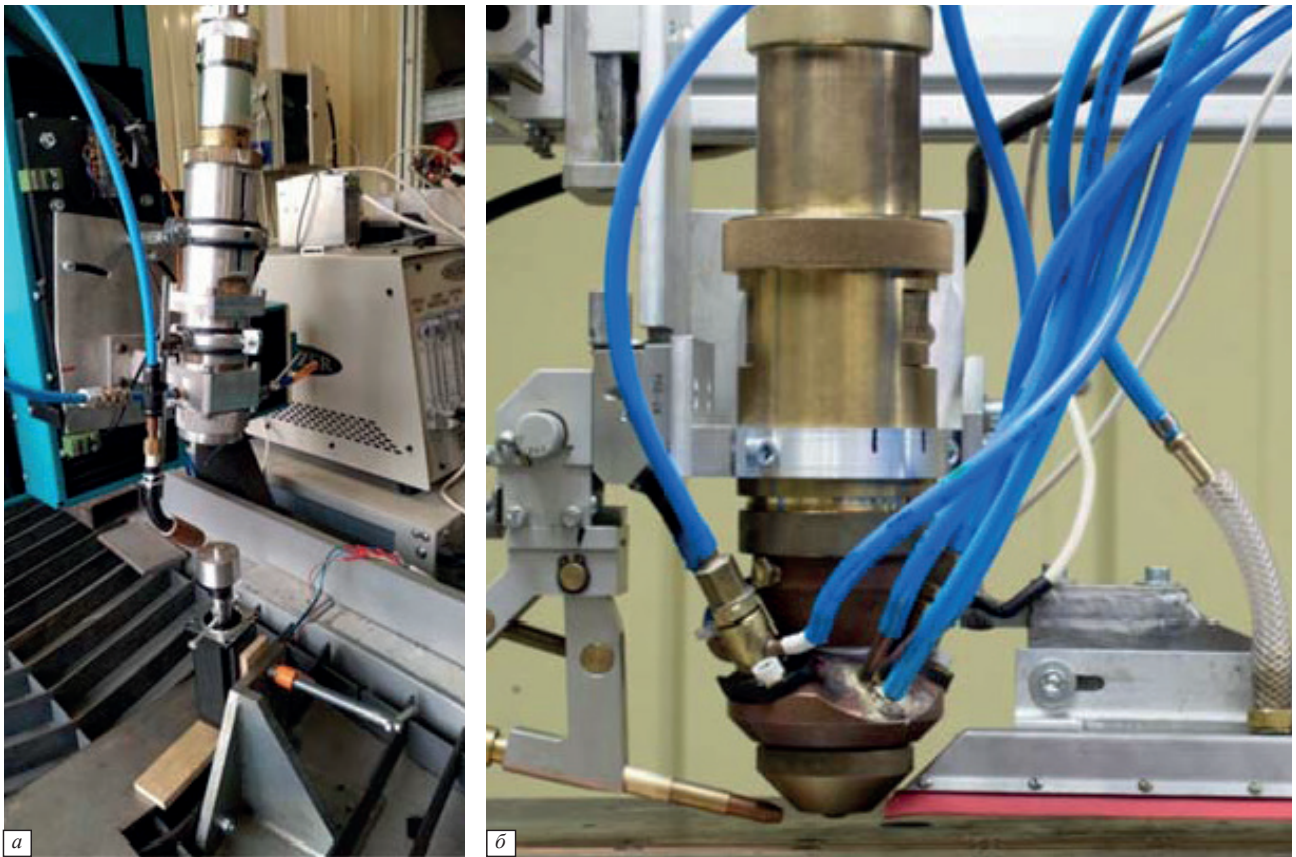


Рис. 6. Створені в спільній лабораторії головки для лазерного (а) і гібридного лазерно-плазмового зварювання (б)

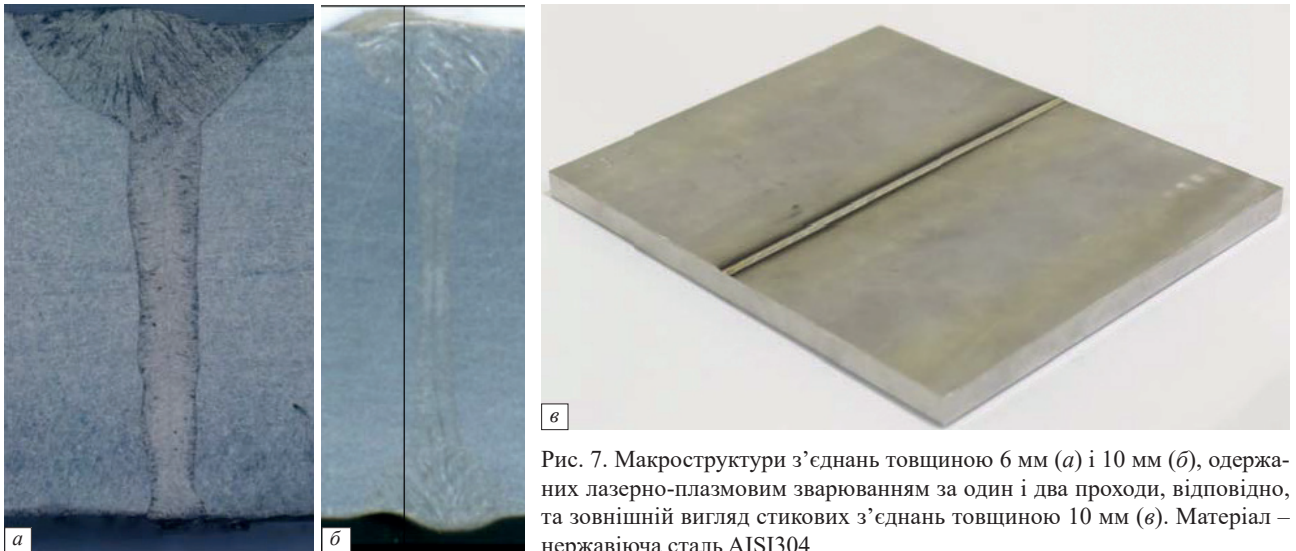


Рис. 7. Макроструктури з'єднань товщиною 6 мм (а) і 10 мм (б), одержаних лазерно-плазмовим зварюванням за один і два проходи, відповідно, та зовнішній вигляд стикових з'єднань товщиною 10 мм (в). Матеріал – нержавіюча сталь AISI304

- гібридне надзвукове електродугове-газополуменеве дводротове напилювання покриттів;
- надзвукове газополуменеве напилювання покриттів порошками та дротами (HVOF);
- плазмові технології сферодизації порошоків;
- вирощування тривимірних виробів адитивним пошаровим мікроплазмовим, плазмовим та дуговим наплавленням (3D-друк).

Для дослідження зазначених технологій наявні відповідні лабораторні приміщення із необхідним технологічним обладнанням (рис. 4). Також передбачено офісні приміщення, сучас-

ний конференц-зал з можливістю проведення он-лайн конференцій, ділянки механічної обробки з фрезерним і токарним верстатами, побутові та складські приміщення тощо. Зокрема, демонстраційно-технологічна дільниця плазмово-дугових та гібридних технологій була сертифікована Сертифікатом на систему менеджменту якості ISO 9001:2015.

Окремо слід відмітити інноваційні гібридні технології, що розробляються на демонстраційно-технологічній дільниці. Так, розроблені обладнання і технології автоматичного та роботи-



Рис. 8. Універсальний технологічний комплекс лазерного та гібридного лазерно-плазмового різання



Рис. 9. Комплекс для лазерного, мікроплазмового і лазерно-мікроплазмового зварювання в контрольованій атмосфері та в динамічному вакуумі



Рис. 10. Зовнішній вигляд установки (а) і процесу (б) мікроплазмового 3D-друку порошковими матеріалами

зованого комбінованого (Plasma+MIG/MAG) і гібридного (Plasma-MIG/MAG) зварювання стисненою дугою неплавкого електрода із дугою плавкого електрода дозволяють з'єднувати листи алюмінієвих сплавів товщиною до 16 мм за один прохід, мінімізувати схильність до утворення внутрішніх пор в швах, підвищувати продуктивність зварювання за рахунок усунення операції розробки крайок, підвищувати швидкість зварювання до 2 разів порівняно із традиційним MIG/MAG-зварюванням (рис. 5).

Створене в спільній лабораторії обладнання і технології лазерного та гібридного лазер-

но-плазмового зварювання дозволяють одержувати з'єднання сталей і сплавів з високою термічною локальністю і швидкістю зварювання. Яскравим прикладом досягнень в галузі лазерно-плазмового зварювання є одержання одно- і двопротидних стикових з'єднань нержавіючої сталі AISI304 товщиною 6 і 10 мм, відповідно, зі швидкістю 60 м/год. при використанні потужності випромінювання волоконного лазера 1,8 кВт (рис. 6, 7).

До перспективних технологічних розробок, створених на базі спільної лабораторії, можна віднести універсальний технологічний ком-

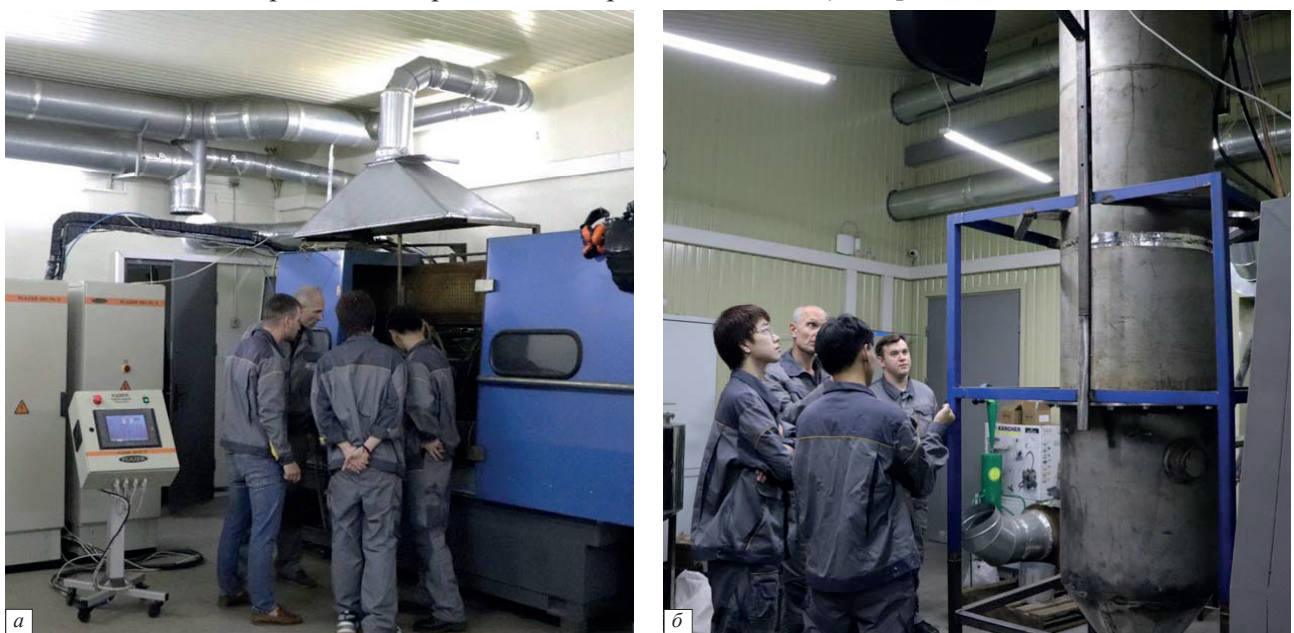


Рис. 11. Обладнання для реалізації плазмово-дугових технологій нанесення покриттів та обробки матеріалів: а – універсальний технологічний комплекс плазмово-дугового напильовання та різання; б – дослідна установка для плазмово-дугової сфероїзації дротових матеріалів та прутків і порошків неправильної форми



Рис. 12. Ознайомлення директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона академіка НАНУ І.В. Кривцуна з можливостями спільної лабораторії

плекс лазерного і гібридного лазерно-плазмового різання (рис. 8), лазерного, мікроплазмового і лазерно-мікроплазмового зварювання в контрольованій атмосфері та в динамічному вакуумі (рис. 9), установку (3D-принтер) для 3D-друку порошковим мікроплазмовим пошаровим наплавленням (рис. 10).

Наразі активно продовжуються роботи по розробці та індустріалізації плазмово-дугових технологій напилювання покриттів та обробки матеріалів, отримання сферичних порошків плазмово-дуговим розпилюванням дротів та прутків, плазмово-дугова сферодизація порошків неправильної форми. З цією метою створено необхідне обладнання і технологічна база (рис. 11).

Після відкриття спільної лабораторії її демонстраційно-технологічну ділянку відвідали провідні співробітники НАН України, зокрема, академіки НАНУ І.В. Кривцун і Л.М. Лобанов (рис. 12). Ними було схвалено технічне оснащення лабораторії та надано високу оцінку науково-технічним розробкам, що в даний час проводяться її співробітниками. В подальшому плануються відвідання спільної лабораторії делегаціями закордонних науковців і менеджерів, які

мають зацікавленість у науковому співробітництві та промислового впровадженні розроблених технологій.

Керівництво спільної лабораторії пропонує застосування описаного передового інноваційного обладнання усіма бажаними науковими дослідниками, студентами і аспірантами. Дослідження можуть проводитися як в межах спільних проєктів, так і за окремими договорами. Окремим завданням є навчання студентів та аспірантів. Лабораторія радо відчиняє двері не лише вітчизняним учням, але й закордонним – усім бажаним підвищити власну кваліфікацію в рамках виконання спільних проєктів та програм. Для цього можуть бути задіяні як спеціалісти лабораторії, так і сторонні спеціалісти. Останні можуть залучатися на окремо встановлених засадах. В цілому, спільна навчально-наукова лабораторія побудована як науково-технологічна експериментальна база колективного користування. Накопичений передовий досвід і наявне інноваційне обладнання спрямовані для залучення в проведенні науково-дослідних робіт в галузях передових технологій зварювання та споріднених процесів.

В.М. Коржик¹, В.В. Квасницький^{1,2}, В.Ю. Хаскін¹

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,

²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ МЕТАЛУ ЗВАРНОГО ШВА ТА МІКРОСТРУКТУРУ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ СТАЛІ 09Г2С

С.Ю. Максимов, Д.М. Кражановський, Ю.А. Шепелюк, С.В. Осинська

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

Одним з перспективних шляхів розв'язання питання підвищення строку експлуатації зварних конструкцій є розробка методів зварювання, заснованих на використанні імпульсного керування енергетичними параметрами процесу. Імпульсний режим зварювання дозволяє здійснювати регульоване тепловкладення в зону зварного з'єднання, керувати режимом плавлення електродного металу, формуванням структури металу шва і зони термічного впливу (ЗТВ). Встановлено, що зі збільшенням частоти імпульсно-дугового зварювання вдається знизити ширину ЗТВ та ділянки крупного зерна. Таким чином, у разі зварювання низьколегованих сталей за рахунок застосування технології з імпульсним процесом є перспектива зменшити ширину ділянки перегріву, що важливо для випадків ремонту стоншень стінок труб під час заплавлення дефектів на діючому трубопроводі механізованим способом. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: магістральні трубопроводи, імпульсно-дугове зварювання, технологічні параметри, зварне з'єднання, геометричні параметри, структура.

Вступ. У наш час через технічний стан нафтогазопромислового устаткування і магістральних трубопроводів вони стають об'єктами підвищеної небезпеки. Дана обставина обумовлює необхідність застосування ефективних методів ремонту. За допомогою традиційних методів зварювання важко розв'язати всі технологічні завдання, що ускладнюються: забезпечення можливості регулювання в широких межах глибини проплавлення, зварювання по підвищених зазорах і в різних просторових положеннях, з'єднання різнорідних по складу металів і сплавів, зменшення розбризкування електродного металу, підвищення стабільності загоряння дуги і її горіння [1].

Основною проблемою при зварюванні неповоротних стиків магістральних трубопроводів є забезпечення необхідної якості кореневих, заповнюючих і облицювальних шарів і високого рівня механічних характеристик у стику, що зварюється. Відомо, що до 90 % дефектів, які виявляються при контролі якості зварних з'єднань, пов'язані з дефектами в корневих шарах зварних швів: підризами, непроварами, неметалічними включеннями, порами [2]. Основною причиною появи зазначених дефектів, крім пов'язаних з поганою підготовкою стику під зварювання, є порушення режимів зварювання (швидкості зварювання, напруги дуги, струму), а також їх невідповідність необхідним значенням, що забезпечують одержання якісних зварних з'єднань. Традиційно застосовувані процеси ручного зварювання можуть забезпечити необхідну якість зварних з'єднань тільки при ретельній підго-

товці стику, що зварюється, і використанні високоякісних матеріалів.

Накопичений досвід показує, що імпульсні методи керування процесом зварювання дозволяють розв'язати наступні технологічні проблеми:

- керований і спрямований перенос електродного металу [3–5];

- можливість виконання зварювання у всіх просторових положеннях і спрощення техніки зварювання [6, 7];

- поліпшення якості зварних з'єднань завдяки більшій концентрації енергії джерела нагрівання і кращим умовам первинної кристалізації [5, 8, 9];

- зменшення втрат на вигар і розбризкування [4, 10].

Аналіз літератури показав, що при імпульсному живленні структура шва дрібнозерниста і розорієнтована, а механічні властивості зварних з'єднань вище, ніж при зварюванні з короткими замиканнями дугового проміжку [11–13]. Накладення імпульсів дозволяє суттєво підвищити інтенсивність і стійкість дугового розряду, змінюються гідродинамічні процеси у зварювальній ванні та умови її кристалізації. Імпульсне підвищення тиску дуги поліпшує формування шва, валик шва стає дрібнолускатим, спостерігається подрібнення мікроструктури, пов'язане з ударним впливом крапель електродного металу [14–16].

Метою проведених досліджень було визначення впливу режимів зварювання та частоти f процесу ім-

пульсно-дугового зварювання на геометричні розміри наплавлень і структурні перетворення у зоні термічного впливу.

Методика експерименту. Для реалізації поставленого завдання використовували джерело живлення ЛЕТ-500. Використовуючи додаткове програмне забезпечення, можна досить гнучко регулювати більшість параметрів джерела, включаючи форму вихідної вольт-амперної характеристики. Імпульсний режим роботи джерела дозволяє працювати на двох таких ВАХ із зазначенням часу роботи кожної (рис. 1, а). Спадні ділянки ВАХ (1 та 2) відповідають струму паузи та імпульсу. Під час перемикавання між характеристиками величина струму зварювання змінюється на відповідне значення для поточної характеристики (рис. 1, б, в).

Для першої частини експериментів були обрані сімейства вольт-амперних характеристик ВАХ № 1 і ВАХ № 2 (рис. 2, а). Головна відмінність між сімействами була в поступовому збільшенні струму паузи, зміщуючи ліворуч падаючу ділянку 1 (крива 1) (ВАХ № 1). При цьому положення кривої 2 (ВАХ № 2) залишилося незмінним.

В роботі використовували імпульсно-дуговий процес з частотою $f = 100$ Гц та шпаруватістю $C = 2$. Погонну енергію Q для кожного експерименту (табл. 1) розраховували за формулою

$$Q = \frac{60I_{\text{ср.}}U_{\text{ср.}}}{v_{\text{зв.}}} \eta,$$

де $v_{\text{зв.}}$ – швидкість зварювання (м/год), $\eta = 0,7$; $I_{\text{ср.}}$ – середній струм зварювання, який розрахо-

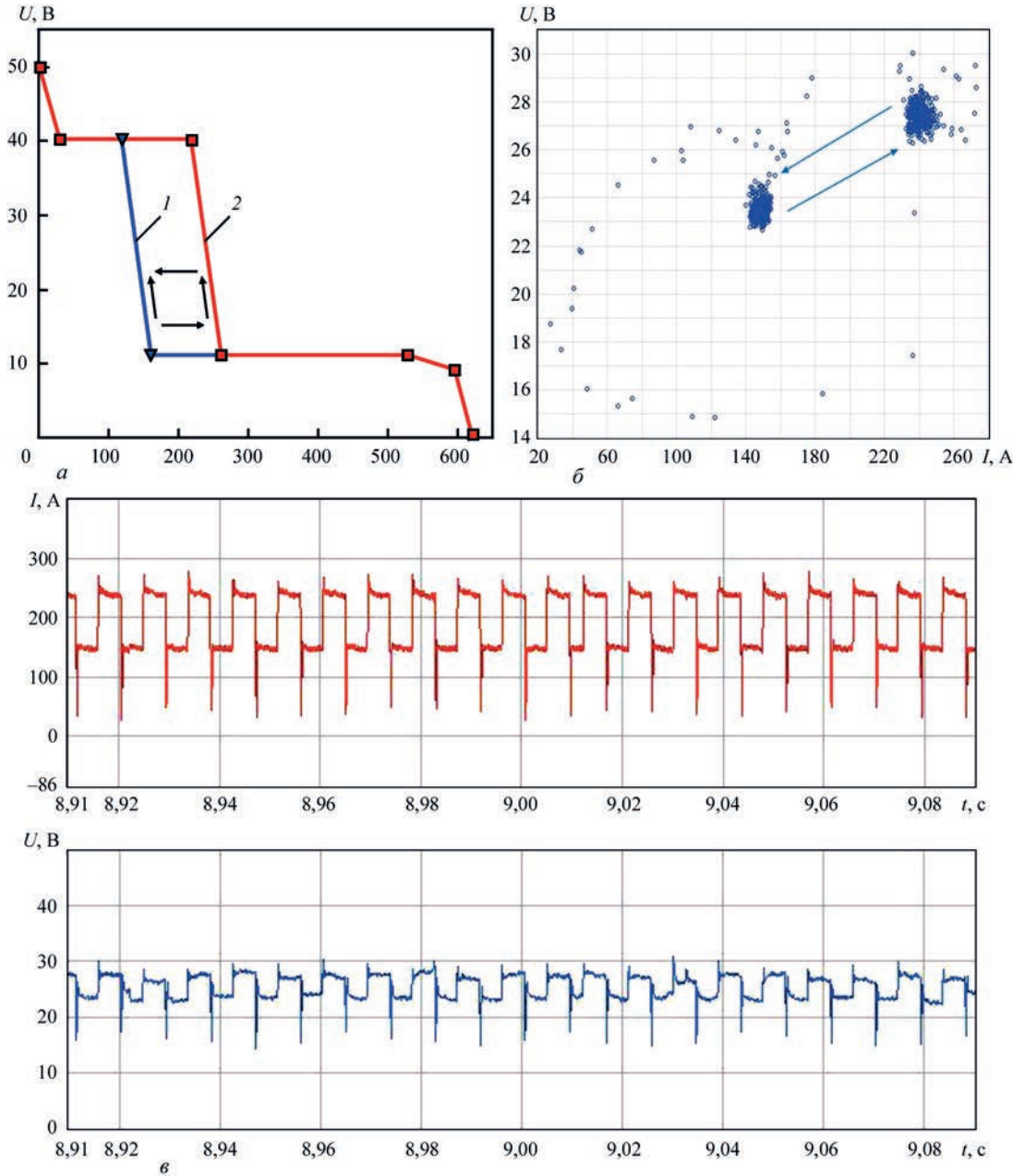


Рис. 1. Комбінація ВАХ джерела живлення для реалізації імпульсного процесу зварювання (а): 1, 2 – відповідно струм паузи та імпульсу; динамічна ВАХ (б) та осцилограма процесу (в, г)

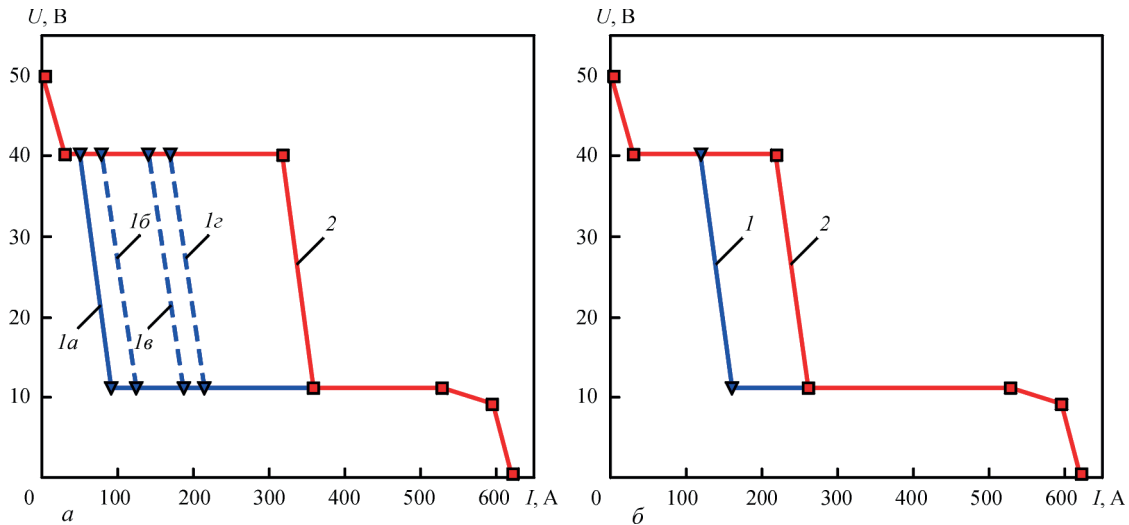


Рис. 2. Сімейство ВАХ для виконання ІДЗ з метою визначення залежності геометричних розмірів b , h від: а – режимів зварювання $I_{\text{ср.}}$, $U_{\text{ср.}}$; б – частоти f процесу (опис 1, 2 див. у тексті)

ується за відомою для імпульсно-дугових процесів формулою, а саме, $I_{\text{ср.}} = (I_{\text{імпульсу}} t_{\text{імпульсу}} + I_{\text{паузи}} t_{\text{паузи}}) / (t_{\text{імпульсу}} + t_{\text{паузи}})$.

З метою визначення як частота f імпульсно-дугового процесу, який протікає з короткими замиканнями, впливає на геометричні характеристики h та b , були проведені експериментальні дослідження. Для цього в імпульсне джерело живлення були введені ВАХ № 1 та ВАХ № 2 (рис. 2, б), швидкість зварювання становила $v_{\text{зв.}} = 30$ см/хв, подача зварювального дроту $v_{\text{др.}} = 6,4$ м/хв. Після налаштування виконувалися наплавлення на пластину на частоті $f = 5, 10, 25, 37, 50, 75, 100$ Гц. Для уникнення теплового впливу від попереднього наплавлення, кожне наступне наплавлення виконувалося після охолодження пластини до 20 °С. Вказані параметри забезпечували наступний режим зварювання $I_{\text{ср.}} = 202 \dots 205$ А, $U_{\text{ср.}} = 21,5$ В. Це, у відповідності до формули, дозволяло отримувати погонну енергію на рівні $Q = 6,0 \dots 6,2$ кДж/см.

Для виявлення впливу частота f ІДЗ на ширину та мікроструктуру ЗТВ зварних з'єднань експериментальна частина роботи передбачала проведення наплавлень на пластину зі сталі 09Г2С з імпульсами частотою 3, 5, 10, 25, 37 та 50 Гц. З метою порівняння отриманих результатів, додатково виконано наплавлення із використанням звичайного процесу механізованого дугового зварювання в суміші $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Для експериментів були обрані вольт-амперні характеристики, зображені

Таблиця 1. Отримані режими імпульсно-дугового процесу при різних положеннях ВАХ № 1

ВАХ № 1	$I_{\text{ср.}}$, А	$U_{\text{ср.}}$, В	Q , кДж/см	$v_{\text{зв.}}$, см/хв	$v_{\text{др.}}$, м/хв
1а	187	22	5,760	30,0	6,8
1б	200	23	6,440		
1в	225	25,4	8,036		
1г	230	29,2	9,402		
1д	230	29,2	9,402		

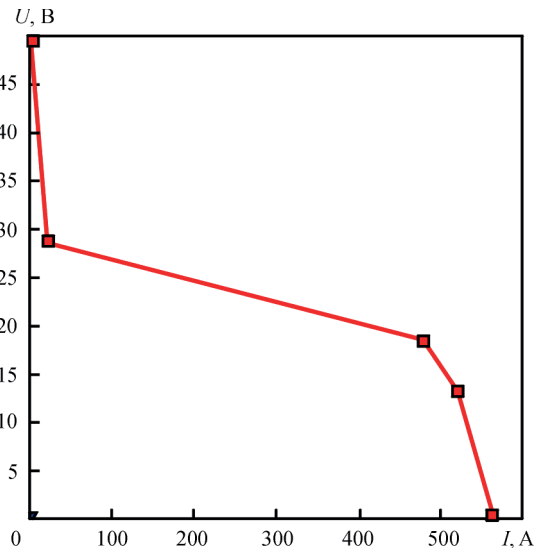


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика джерела живлення для виконання механізованого зварювання стаціонарним процесом

на рис. 2, б, що забезпечували імпульсно-дуговий та звичайний (рис. 3) процес зварювання.

Режими механізованого зварювання ($I_{\text{ср.}}$, $U_{\text{ср.}}$) дротом Св08Г2С діаметром 1,2 мм в суміші $\text{Ar} + \text{CO}_2$ для обох процесів визначалися за допомогою комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи IMS 2007 (табл. 2). Погонну енергію Q для кожного експерименту визначали за формулою.

Таблиця 2. Режими механізованого зварювання

f , Гц	$I_{\text{ср.}}$, А	$U_{\text{ср.}}$, В	Q , кДж/см	$v_{\text{др.}}$, м/хв	$v_{\text{зв.}}$, см/хв	Примітка
3	203	21,8	6,195	6,4	30,0	ІДЗ
5	203	21,6	6,139			
10	198	22,2	6,153			
25	207	21,1	6,115			
37	198	22,3	6,181			
50	205	21,0	6,027	6,4	30,0	Стационар.
–	200	22,1	6,188			

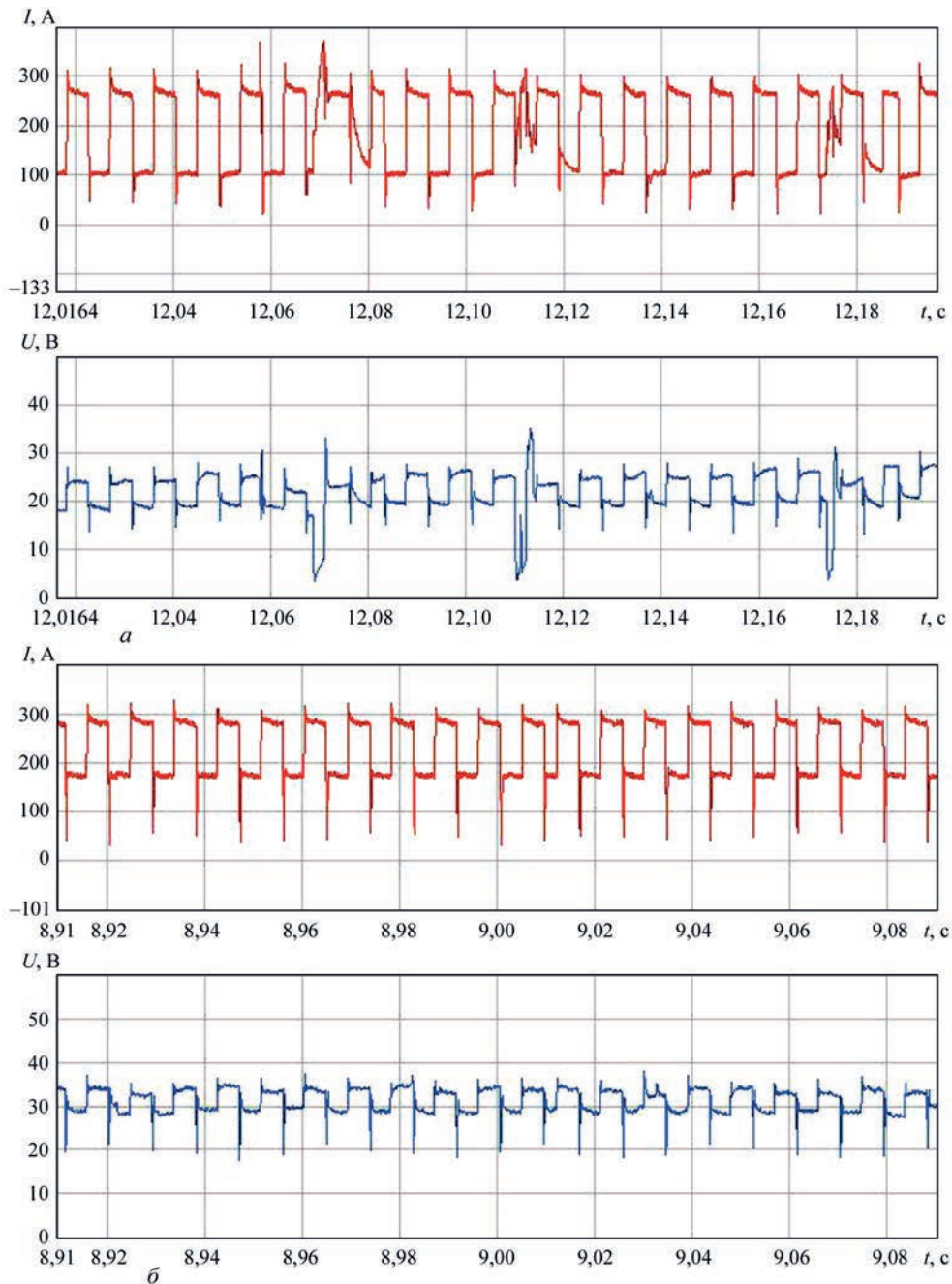


Рис. 4. Осцилограми процесів імпульсно-дугового процесу: *а* – з короткими замиканнями (для $I_{ср.} = 187$ А); *б* – без коротких замикань (для $I_{ср.} = 225$ А)

Після виконання наплавлень на пластину товщиною 12 мм були виготовлені шліфи для металографічних досліджень металу шва та ЗТВ. Твердість ділянок ЗТВ та шва вимірювали на мікротвердомірі М-400 «Лесо».

В результаті обробки даних осцилограм було встановлено, що поступове збільшення величини струму паузи спричинює зростання середнього струму зварювання, що підвищує потужність процесу. Враховуючи, що швидкість подачі зварювального дроту залишається незмінною, відбувається більше розплавлення металу на торці електрода та подовження дугового проміжку. Ми можемо спостерігати збільшення середньої

напруги зварювання. Також спостерігається змінення імпульсно-дугового процесу з короткими замиканнями на процес без короткого замикання (рис. 4).

На гістограмах напруги дуги це відображається наявністю миттєвих значень в діапазоні $U_{к.з.} = 3 \dots 10$ В (рис. 5, *а*), що характерно для коротких замикань, та у порівнянні із ІДЗ на «довгій» дузі їх відсутністю (рис. 5, *б*).

Результати досліджень та обговорення. Регулювання ВАХ № 1 з позиції 1а до позиції 1г призводить до збільшення величини погонної енергії $Q = f(I_{ср.}, U_{ср.})$ із відповідними змінами геометричних розмірів та форми наплавлених валиків

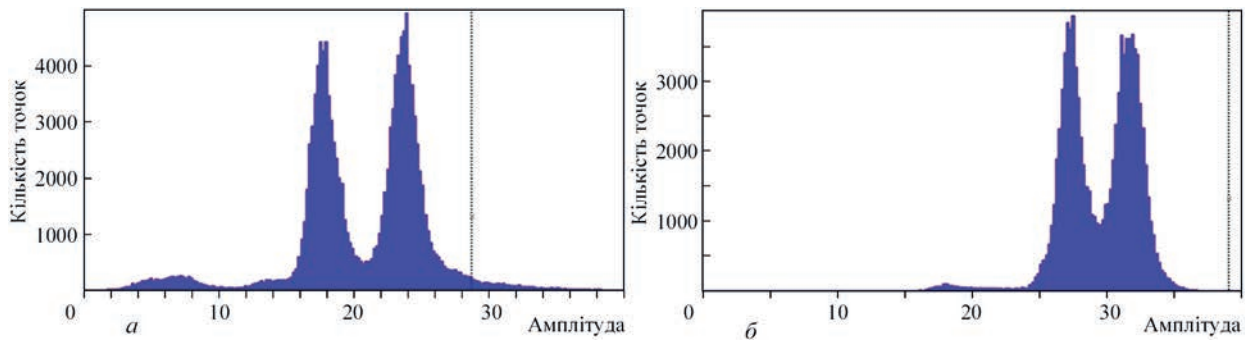


Рис. 5. Гістограми миттєвих значень напруги дуги при імпульсно-дуговому процесі: а – з короткими замиканнями (для $I_{\text{ср.}} = 187\text{A}$); б – без коротких замикань (для $I_{\text{ср.}} = 225\text{A}$)

при $v_{\text{др.}} = \text{const}$, $v_{\text{зв.}} = \text{const}$. Встановлено, що збільшення струму паузи призводить до підвищення $U_{\text{ср.}}$, і це в кінцевому випадку відбивається у підвищенні ширини валиків b із відповідним зменшенням глибини проплавлення h (рис. 6).

Вплив погонної енергії $Q = f(I_{\text{ср.}}, U_{\text{ср.}})$ імпульсно-го процесу на середню величину глибини проплавлення h та ширини b валиків наведений на рис. 7.

Аналіз результатів замірів ширини наплавлень та глибини проплавлення показав, що збільшення величини частоти f з 5 до 100 Гц не призводить до зміни геометричних розмірів. Найбільш суттєво вплив частоти f відбивається на лускатості валиків: із збільшенням f до 100 Гц лускатість зменшується (рис. 8). Це пов'язано з тим, що швидкоплинне переключення роботи імпульсного джерела живлення з ВАХ № 2, яка відповідає за максимальний енергетичний рівень процесу, на ВАХ № 1, котра визначає мінімальний енергетичний рівень, не призводить до суттєвого охолодження розплавленого металу. Тепловий режим ванни наближається до квазістаціонарного стану, який характерний для звичайного зварювання з короткими замкненнями без імпульсного впливу.

Дослідження впливу частоти f ІДЗ на ширину та мікроструктуру ЗТВ зварних з'єднань показали, що структура наплавленого металу шва фер-

ритно-перлітна з окремими ділянками доевтектоїдного фериту по границям кристалітів. Що стосується ЗТВ, то аналіз у випадках як ІДЗ, так і при стаціонарній дузі, показав, що на ділянці великого зерна формуються практично однакові види структурних складових. Тобто в цілому структура цієї ділянки в усіх зразках феритно-перлітна з різними модифікаціями фериту: упорядкованою другою фазою, відманштеттовою, полієндрічною (рис. 9). В зразках, що були отримані при виконанні ІДЗ з частотами $f = 37, 50$ Гц та стаціонарним режимом зварювання, додатково були виявлені структури бейніту.

Розмір зерен на ділянці перегріву ЗТВ збільшується з підвищенням частоти f . Так, для $f = 3, 5$ Гц бал зерна складає 7-8 ($D_{\text{зер}} = 22...30$ мкм); при $f = 10$ Гц – 7 ($D_{\text{зер}} = 30$ мкм); $f = 25, 37$ Гц – 6, 7 ($D_{\text{зер}} = 30...44$ мкм). Для $f = 50$ Гц та стаціонарного процесу зварювання бал зерна складає 6 ($D_{\text{зер}} = 44$ мкм).

Вимірювання мікротвердості $HV1$ в різних зонах показало, що поступове збільшення частоти f не призводить до суттєвих змін в значеннях середньої величини мікротвердості на ділянці великого зерна (рис. 10).

Середнє значення мікротвердості для $f = 50$ Гц наближається до такого, що отримано при зварюванні стаціонарною дугою. При аналізі цих ре-

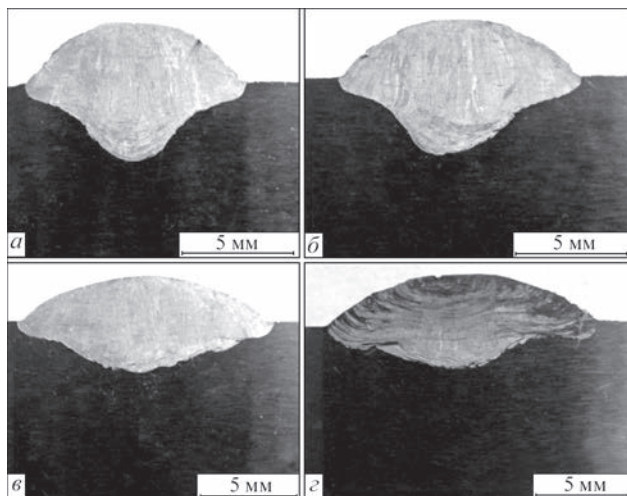


Рис. 6. Макрошліфи наплавлень, виконаних при різних ВАХ № 1: а – положення 1а; б – 1б; в – 1в; г – 1г

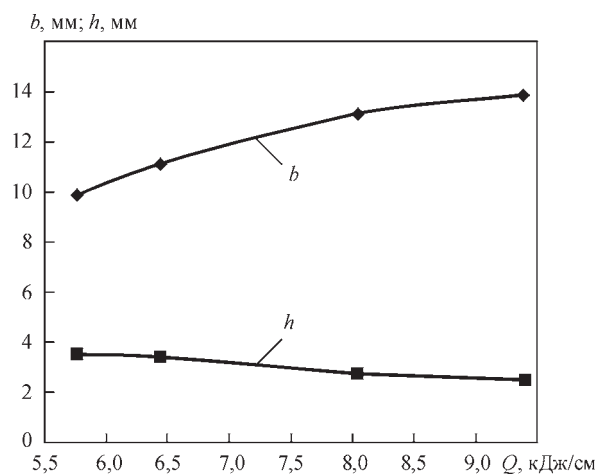


Рис. 7. Залежність глибини проплавлення h та ширини b від погонної енергії $Q = f(I_{\text{ср.}}, U_{\text{ср.}})$ імпульсного процесу

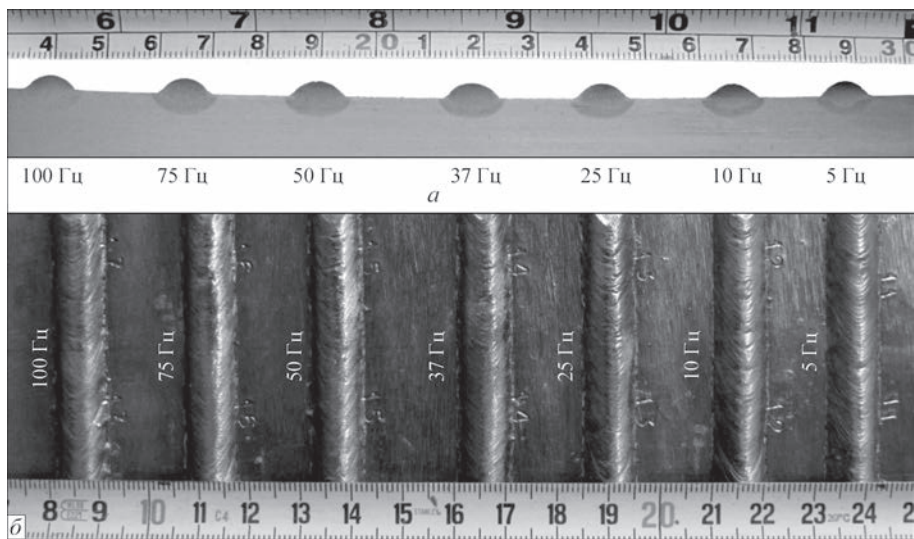


Рис. 8. Вплив частоти f імпульсного процесу на переріз валиків (а); лускатість наплавленого металу (б)

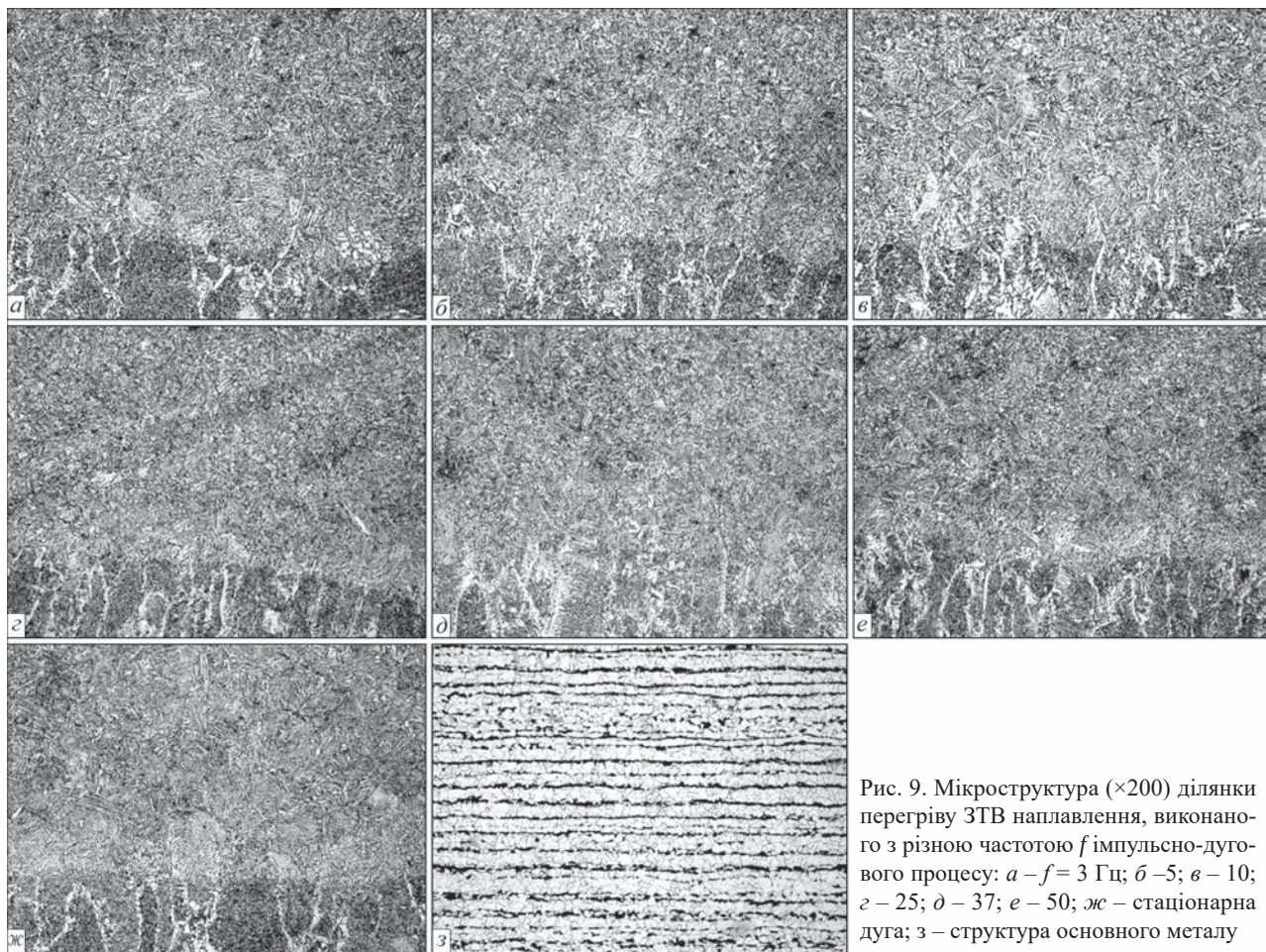


Рис. 9. Мікроструктура ($\times 200$) ділянки перегріву ЗТВ наплавлення, виконаного з різною частотою f імпульсно-дугового процесу: а – $f = 3$ Гц; б – 5; в – 10; г – 25; д – 37; е – 50; ж – стаціонарна дуга; з – структура основного металу

зультатів створюється враження, що зі збільшенням частоти f ІДЗ за ефектом впливу на метал ЗТВ наближається до процесу зварювання стаціонарною дугою.

Відносно ще одного показника – ширини ЗТВ – результати металографічних досліджень показали поступове, незначне зменшення загальної ширини ЗТВ з підвищенням частоти f до 50 Гц (рис. 11).

Подібна тенденція спостерігається і для ділянки великого зерна в ЗТВ. Проте у порівнян-

ні із стаціонарним процесом зварювання ширина цієї ділянки зменшується більш суттєво – на 25...30 %. Таким чином, у разі зварювання низьколегованих сталей за рахунок застосування технології з імпульсним процесом є перспектива впливати на ширину ділянки перегріву ЗТВ при різних значеннях частот і відносно малих значеннях погонної енергії Q (6,0...6,2 кДж/см). З практичної точки зору це дозволяє зменшити в ЗТВ частку несприятливої, малопластичної ділянки

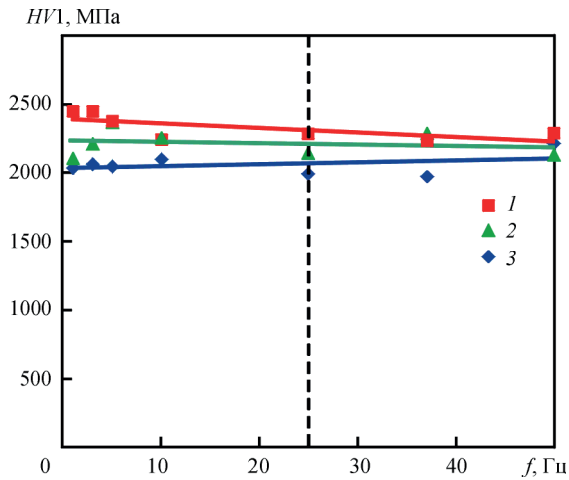


Рис. 10. Вплив частоти ІДЗ f на розподіл мікротвердості $HV1$ на різних ділянках ЗТВ: 1 – ділянка великого зерна біля лінії сплавлення; 2 – ділянка крупного зерна біля ділянки перекристалізації; 3 – зварний шов біля лінії сплавлення

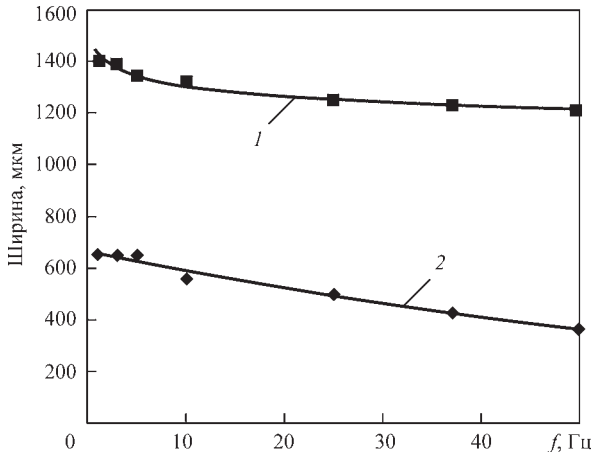


Рис. 11. Вплив частоти ІДЗ f на загальну ширину ЗТВ (1) та ширину ділянки великого зерна (2) при $Q = 6,0 \dots 6,2$ кДж/см перегріву, що важливо для випадків ремонту стоншень стінок труб під час заплавлення дефектів на діючому трубопроводі механізованим способом.

Висновки

1. Встановлено, що поступове збільшення струму паузи за рахунок зміщення спадної ділянки ВАХ при незмінній швидкості подачі електродного дроту призводить до підвищення напруги дуги і, як наслідок, імпульсно-дуговий процес з короткими замиканнями змінюється на процес без коротких замикань. При цьому спостерігається підвищення ширини валиків на 30...40 % із відповідним зменшенням глибини проплавлення на 25...30 %.

2. Збільшення частоти з 5 до 100 Гц не впливає на геометричні параметри зварного шва, проте спостерігається зменшення лускатості.

3. Показано, що зміна частоти ІДЗ практично не впливає на структурні складові на ділянці великого зерна ЗТВ, які також співпадають зі зразком, звареним стаціонарними режимами зварювання. Також не

спостерігається суттєвих змін в значеннях середньої величини мікротвердості на ділянці великого зерна.

4. Встановлено, що підвищення частоти прямо пропорційно впливає на розмір зерен на ділянці перегріву ЗТВ. Так, зі збільшенням частоти ІДЗ з 3 до 50 Гц розмір зерен на ділянці перегріву ЗТВ збільшується з 8 ($D_{\text{зер}} = 22$ мкм) до 6 ($D_{\text{зер}} = 44$ мкм).

5. Встановлено, що підвищення частоти ІДЗ дозволяє знизити ширину ЗТВ та ділянки великого зерна. При цьому зменшення ширини ділянки великого зерна більш суттєве і досягає 25...30 % при частоті $f = 50$ Гц.

Список літератури

1. Сараев Ю.Н., Макарова Л.И., Кирилова Н.В. и др. (2001) Пути повышения эффективности строительства, эксплуатации и ремонта нефтегазового оборудования и магистральных трубопроводов на основе адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки. *Сварочное производство*, 5, 31–37.
2. Мазель А.Г., Тарлинский В.Д., Шейкин М.З. и др. (1979) *Современные способы сварки магистральных трубопроводов плавлением*. Москва, Недра.
3. Saraev, Yu.N. (1999) Increase in efficiency of arc welding based on an adaptive algorithm for pulsed control of process energy parameters. *Welding Conference LUI Join'99 International Conference on Efficient Welding in Industrial Applications (ICEWIA)*, сс. 222–226.
4. Крампит Н.Ю., Крампит А.Г. (2014) Исследование процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*, 5, 106–112.
5. Князьков А.Ф., Князьков С.А. (2011) Активное управление плавлением и переносом электродного металла. *Сварка и диагностика*, 4, 27–32.
6. Веревкин А.В. (2010) *Повышение эффективности сварки в CO_2 неповоротных стыков магистральных трубопроводов за счет применения импульсного питания сварочной дуги*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул.
7. Крампит М.А., Буракова Е.М., Зубенко Л.Н. (2014) Тенденции развития импульсных способов управления процессом сварки. *Инновационные технологии и экономика в машиностроении. Сб. тр. V Международной научно-практической конференции. Т. 1. 22–23 мая 2014 г.*
8. Якушин Б.Ф., Бакуло А.В. (2017) О механизме формирования структуры металла шва при импульсно-дуговой сварке. *Сварочное производство*, 9, 29–35.
9. Manikya Kanti. K., Srinivasa Rao, P., Ranga Janardhana, G. (2013) Optimization of Weld Bead Penetration in Pulsed Gas Metal Arc Welding using Genetic Algorithm. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3, 3, 368–371.
10. Жерносеков А.М., Андреев В.В. (2007) Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, 10, 48–52.
11. Golikov, N.I., Maksimova, E.M., Saraev, Yu.N. (2019) Investigation of the microstructure of the heat-affected zone of low-alloyed steel during pulsed arc aelding under conditions of low climatic ambient temperatures. *OP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 681.
12. Завдовсєв А.В., Позняков В.Д., Rogante M. та ін. (2020) Особливості формування структури і властивості з'єднань сталі S460M, виконаних імпульсно-дуговим зварюванням. *Автоматичне зварювання*, 6, 11–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.06.02>
13. Завдовсєв А.В., Позняков В.Д., Жданов С.Л. та ін. (2020) Вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шву і ЗТВ зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей. *Там само*, 12, 23–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.12.03>

14. Крампіт А.Г., Крампіт Н.Ю. (2015) Способы управления формированием сварного шва. *Технологии и материалы*, 2, 21–26.
15. Голиков Н.И., Сидоров М.М., Максимова Е.М., Сараев Ю.Н. (2018) Исследование микроструктуры сварных соединений, выполненных в условиях отрицательных температур. Наука – Образование – Производство: Опыт и перспективы развития. *Сб. материалов XIV Международной научно-технической конференции (8–9 февраля 2018 г.)*, сс. 161–164.
16. Saraev, Y.N., Bezborodov, V.P. (2013) Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels. *Welding International*, 27, 9, 678–680.
7. Krampit, M.A., Burakova, E.M., Zubenko, L.N. (2014) Tendencies of development of pulsed methods for welding process control. In: *Proc. of 5th Int. Sci.-Pract. Conf. on Innovative Technologies and Economics in Mechanical Engineering*, Vol. 1, 22–23 May 2014.
8. Yakushin, B.F., Bakulo, A.V. (2017) On mechanism of weld metal structure formation in pulsed arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, 9, 29–35 [in Russian].
9. Manikya Kanti, K., Srinivasa Rao, P., Ranga Janardhana, G. (2013) Optimization of Weld Bead Penetration in Pulsed Gas Metal Arc Welding using Genetic Algorithm. *Int. J. of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3), 368–371.
10. Zhernosekov, A.M., Andreev, V.V. (2007) Consumable electrode pulsed arc welding. *The Paton Welding J.*, 10, 48–52.
11. Golikov, N.I., Maksimova, E.M., Saraev, Yu.N. (2019) Investigation of the microstructure of the heat-affected zone of low-alloyed steel during pulsed arc welding under conditions of low climatic ambient temperatures. *OP Conf. Series: Materials Sci. and Engineering*, 681.
12. Zavdoveev A.V., Poznyakov V.D., Rogante M., et al. (2020) Features of structure formation and properties of joints of S460M steel made by pulsed-arc welding. *The Paton Welding J.*, 6, 9–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.06.02>.
13. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L. et al. Influence of pulsed-arc welding conditions on change of parameters of weld and HAZ of welded joints and mechanical properties of low-alloy steels. *The Paton Welding J.*, 10, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.12.03>.
14. Krampit, A.G., Krampit, N.Yu. (2015) Methods of weld formation control. *Tekhnologii i Materialy*, 2, 21–26 [in Russian].
15. Golikov, N.I., Sidorov, M.M., Maksimova, E.M., Saraev, Yu.N. (2018) Examination of microstructure of welded joints made under negative temperature conditions. Science – Education – Production: Experience and Prospects of Development. In: *Proc. of 14th Int. Sci.-Tech. Conf. (8-9 February 2018)*, 161–164.
16. Saraev, Y.N., Bezborodov, V.P. (2013) Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels. *Welding Intern.*, 2(9), 678–680.

References

EFFECT OF PARAMETERS OF PULSE-ARC WELDING ON THE FORMATION OF WELD METAL AND MICROSTRUCTURE OF HEAT-AFFECTED-ZONE OF 09G2S STEEL

S.Yu. Maksymov, D.M. Krazhanovsky, Yu.A. Shepelyuk, S.V. Osynska

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

One of the promising ways to solve the problem of increasing the life of welded structures is the development of welding methods based on the use of pulsed control of energy parameters of the process. The pulsed mode of welding allows performing a regulated heat input in the welded but zone, controlling the mode of melting the electrode metal, forming weld metal structure and the heat-affected-zone (HAZ). It was found that with an increase in the frequency of pulse-arc welding, it is possible to reduce the width of the HAZ and a region of a coarse grain. Thus, in the case of welding low-alloy steels, due to the use of technology with a pulse process, there is a prospect of reducing the width of the overheating region, which is important for the cases of repair of pipe walls thinning during remelting of defects in the operating pipeline using a mechanized method. 16 Ref., 2 Tabl., 11 Fig.

Key words: main pipelines, pulse-arc welding, technological parameters, welded joint, geometric parameters, structure.

Надійшла до редакції 26.01.2022



Materials, methods and technologies
24th International Conference
19-22 August, 2022
Burgas, Bulgaria
<http://bit.ly/2Aa6Jk3>



ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ НА ЗНЕВУГЛЕЦЮВАННЯ В ЗОНІ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ СТАЛІ Р91 В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ РІЗНОРІДНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ВИСОКОГО ВІДПУСКУ

М.О. Німко, В.Ю. Скульський, А.Р. Гаврик, І.Г. Осипенко

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

Внаслідок різниці в хімічному потенціалі вуглецю після відпуску та при високотемпературній експлуатації в зварних з'єднаннях різнорідних сталей відбувається міграція вуглецю з менш легованої сталі в більш леговану. Зневуглецювання в пришовній ділянці ЗТВ менш легованої сталі може призводити до утворення експлуатаційних дефектів та послідовних руйнувань. З теорії масопереносу відомо, що в полікристалічних тілах дифузія елементів вкорінення, в тому числі і вуглецю, найшвидше відбувається по границям зерен. Теоретично зменшення дифузії вуглецю можна досягти за допомогою збільшення розмірів зерен в пришовній зоні ЗТВ, що призведе до зменшення загальної площі границь зерен на одиницю об'єму на цій ділянці. В роботі досліджували вплив кута нахилу електрода та сили зварювального струму при наплавленні аустенітного металу на сталь Р91 на ширину зневуглецьованого прошарку, що виникає при послідовному відпуску при температурах 700 та 760 °С. Показано, що зі збільшенням кута нахилу електрода та сили струму наплавлення ширина результуючого зневуглецьованого прошарку зменшується. Бібліогр. 18, рис. 10.

Ключові слова: дифузія вуглецю, з'єднання різнорідних сталей, зона термічного впливу, зневуглецьований прошарок, границі зерен

Вступ. З початку використання в трубних системах котлів комбінованих з'єднань з аустенітними нержавіючими сталлями та відповідних зварювальних матеріалів в 1940-х роках почали виникати проблеми, пов'язані з міграцією вуглецю з менш легованої сталі в більш леговану. В 1950-х роках були зареєстровані перші аварії і було докладено зусилля для поліпшення режиму роботи устаткування і для розуміння причин даного явища. На 1960-і роки випало збільшення використання перехідних швів з аустенітних матеріалів для потреб котлобудування, особливо коли температура пари виросла до 566 °С. У 1970-х і 1980-х роках обсяги використання і кількість відмов перехідних швів зросла. Багатьма дослідженнями причин цих аварій показано, що важливим фактором є міграція вуглецю в зварних з'єднаннях різнорідних сталей при підвищених температурах [1].

Оскільки феритні сталі мають більший вміст вуглецю, ніж аустенітні, градієнт концентрації вуглецю в зоні контакту цих сталей зменшується від феритної сталі в напрямку аустенітної. При підвищених температурах вуглець дифундує в напрямку пониження градієнту хімічного потенціалу. Важливо зазначити, що хром знижує хімічний потенціал вуглецю [2], при цьому вміст хрому збільшується від феритно-мартенситної сталі до аустенітної. Тому градієнти концентрацій хрому та вуглецю створюють достатньо

різкий градієнт хімічного потенціалу поперек зони сплавлення. Крім того, коефіцієнт дифузії вуглецю в фериті значно вищий, ніж в аустеніті, в той час як розчинність – нижча. Результатом цих факторів є сильна рушійна сила для дифузії вуглецю від феритної сталі до аустенітної, наслідком якої є утворення зневуглецьованого прошарку в феритній сталі.

Зневуглецьований прошарок має понижені механічні властивості, які можуть бути охарактеризовані зменшенням твердості і високою концентрацією локалізованої деформації, вимірюваної під час випробування на розтяг [1]. Важливим аспектом деградації властивостей, пов'язаним зі зневуглецюванням, є втрата механізму довготривалого зміцнення по причині розчинення карбідів $M_{23}C_6$, M_7C_3 та карбонітридів MX [3], що зменшує дисперсійне зміцнення. Також процес рекристалізації усуває об'єднаний вплив дислокаційного і субзернограничного зміцнення [4]. Наслідком є можливість руйнування всередині зневуглецьованого прошарку [1, 5, 6].

В свою чергу в більш легованій сталі утворюється науглецьований прошарок. В роботі [7] було показано, що в такому науглецьованому прошарку можуть зароджуватися мікротріщини. Мікротріщини переважно зароджуються в перехідній зоні та мають міжзеренний характер.

В зв'язку з цим повстає необхідність зменшення зневуглецьованого прошарку в з'єднаннях різ-

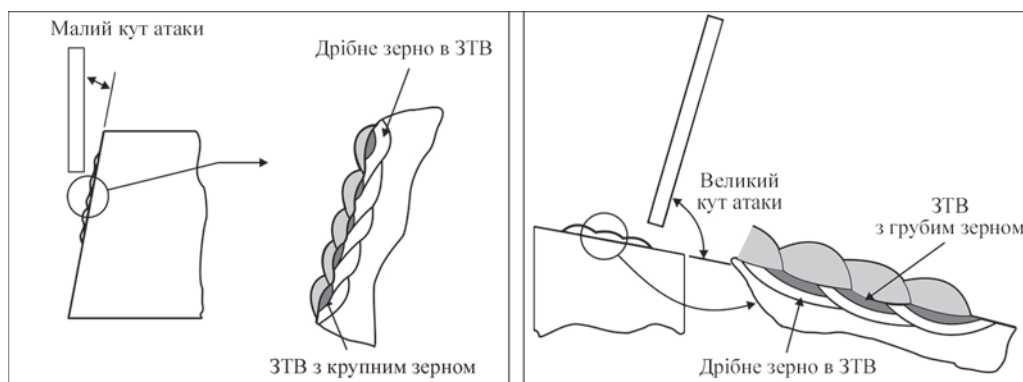


Рис. 1. Техніка плакування аустенітним металом кромки пластин [13]

норідних сталей при високотемпературній експлуатації в умовах повзучості. Загально прийнято для зменшення дифузії вуглецю використовувати нікелеві зварювальні матеріали. Однак більшість дослідників вважає, що традиційні матеріали на основі нікелю (наприклад, Ni 6082, Ni 6182, Ni 6117, Ni 6625 по ДСТУ ISO 14172) не можуть ефективно повністю стримувати дифузію вуглецю з мартенситної сталі в шов, оскільки в більшості нікелевих сплавів, використовуваних як зварювальний матеріал, міститься велика кількість карбідоутворювачів, зокрема хрому [8–11].

Проблема зі стримування дифузійного перерозподілу вуглецю залишається актуальною та потребує інших підходів (шляхів) її вирішення. В першій частині роботи [12] були виконані дослідження впливу режимів наплавлення (погонної енергії та температури підігріву) аустенітним зварювальним матеріалом на розвиток ширини знеуглецьованого прошарку в сталі X10CrMoVNb9-1 (P91) при відпуску при температурі 750 °C впродовж 7 та 18 год та було з'ясовано, що зі зростанням величини погонної енергії ширина прошарку після відпуску зменшується; зі зростанням температури підігріву від 20 до 195 °C ширина прошарку після відпуску також зменшується, а потім починає зростати з підігрівом до 300 °C. Враховуючи, що вказані вище дослідження були виконані з використанням одношарових аустенітних наплавлень на поверхню мартенситної сталі, вимагалось перевірити одержані закономірності на реальних комбінованих з'єднаннях.

Мета роботи полягала в перевірці впливу режиму та техніки зварювання (кута нахилу електрода) на кінетику знеуглецьовання в пришовній ділянці ЗТВ менш легованої сталі в комбінованих зварних з'єднаннях після високого відпуску.

Методика досліджень. Для експериментів вибрано мартенситну сталь P91 (X10CrWMoVNb9-2 (1.4901) по ДСТУ EN 10216-2:2016), що містить 9 % Cr (мас. %: 0,1 C; 0,34 Si; 0,47 Mn; 8,52 Cr; 0,28 Ni; 0,93 Mo; 0,2 V; 0,072 Nb; 0,06 N). Щоб створити різницю в легуванні, для наплавлення був вибраний аустенітний зварювальний матеріал

Fox CN 23/12 Mo-A (мас. %: 0,01 C; 0,63 Si; 0,73 Mn; 23,0 Cr; 13,1 Ni; 2,6 Mo). Такі стикові з'єднання можуть зустрічатися при зварюванні трубних систем котлів, наприклад, колектору зі сталі P91 з пароперегрівачами з аустенітних сталей.

Використовували два різних підходи до зварювання:

1) Для оцінки впливу техніки зварювання, а саме кута нахилу електрода на кінетику знеуглецьовання виконували однопрохідні наплавлення (щоб усунути вплив повторного нагріву) на пластини зі сталі P91 за допомогою електродів Fox CN 23/12 Mo-A. Наплавлення виконували на малому (~30°) та великому (~90°) кутах нахилу. Передбачали, що кожний режим завдає різний ступінь перегріву пришовної зони і, як відомо, спричиняє зменшення чи збільшення розмірів мікроструктурних ділянок з крупним зерном (рис. 1). Більший кут нахилу електрода сприяє більшому прогріву пришовної зони і навпаки – при меншому куті нахилу спостерігається менший прогрів.

Наплавлення в обох випадках виконували на режимі $I_{зв} = 120$ А, $U_d = 24$ В, $v_{зв} \approx 4,5$ мм/с при кімнатній температурі.

Після наплавлення зразки розрізали на два темплети (рис. 2). Для інтенсифікації процесів дифузії вуглецю і утворення знеуглецьованого прошарку їх піддавали відпуску при температурі 700 °C тривалістю 7 та 18 год для інтенсифікації процесів дифузії вуглецю і утворення знеуглецьованого прошарку. З темплетів в стані після відпуску виготовляли шліфи, які травили електролітично в H_2CrO_4 впродовж 15 с з напругою 10 В для виявлення знеуглецьованого прошарку.

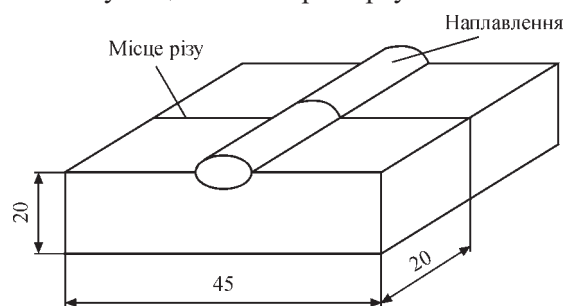


Рис. 2. Схема порізки наплавлення на темплети

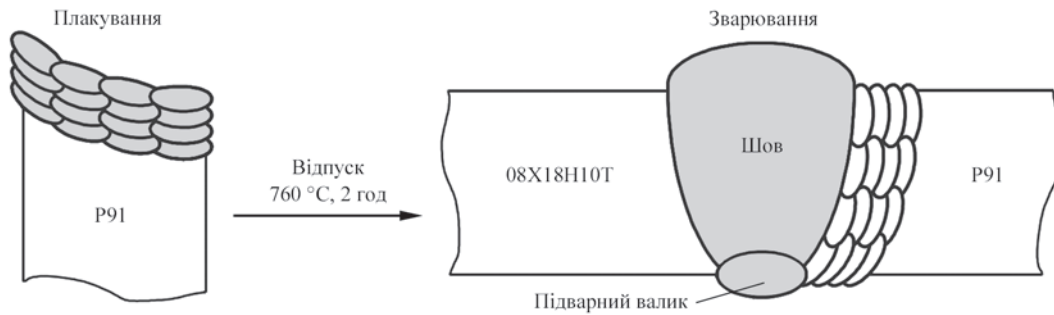


Рис. 3. Схема виконання плакування і зварювання

2) Для оцінки впливу режиму зварювання на кінетику знеуглецювання в реальному зварному з'єднанні виконували два дослідних з'єднання на пластинах з мартенситної сталі Р91 товщиною 20 мм. Перед зварюванням стиків виконували попереднє наплавлення на кромку сталі Р91 аустенітними електродами Fox CN 23/12 Мо-А діаметром 3,2 мм в 4-5 шарів. Після наплавлення пластину відпускали при 760 °C, 2 год. Наплавлену і відпущену кромку зварювали за допомогою електродів Fox CN 23/12 Мо-А зі сталлю 08Х18Н10Т на струмі $I_{зв} = 120$ А, розкриття кромки – 60° (рис. 3). Для забезпечення якісного формування зварних з'єднань, після заповнення розробки проводили підварку кореня зі зворотної сторони стику.

Необхідність високого відпуску при температурі 760 °C в з'єднаннях мартенситних сталей пояснюється тим, що після зварювання в ЗТВ таких сталей виникає надлишок дислокацій. В присутності залишкових напружень висока щільність дислокацій прискорює процеси звороту та рекристалізації в сталі, що згубно впливає на тривалу міцність [4]. Високий відпуск призводить до зменшення щільності дислокацій і, таким чином, сприяє підвищеній тривалій міцності в діапазоні низьких навантажень при високотемпературній експлуатації.

Перевіряли два режими наплавлення:

- з малим кутом нахилу (~30°) на струмі $I = 110$ А;
- з великим кутом нахилу (~90°) на струмі $I_{зв} = 130$ А.

Після зварювання для частини зразків виконували відпуск 700 °C, 14 год для імітації теплового впливу при експлуатації (відповідає ~16,8 тис. год при температурі 600 °C при переводі за допомогою параметру Ларсона-Міллера [14]). Зі зразків після зварювання та після відпуску виготовляли шліфи. Для виявлення мікроструктури металу зварних з'єднань застосовували електролітичне травлення у хромовій кислоті ($U = 10$ В, $t = 10$ с). Мікротвердість вимірювали на твердомірі ПМТ-3 при навантаженні 100 г. Металографічний аналіз проводили з застосуванням світлового мікроскопу NEOPHOT-3.

В літературі, наприклад [15], застосовується поняття ефективної ширини дифузійного прошарку, яка визначається найкоротшою відстанню від поверхні насичення (наприклад, лінії сплавлення)

до ділянки виміру. Ця ширина характеризується встановленим номінальним значенням базового параметра, в якості якого приймають або концентрацію дифундуючого елемента, або властивість (твердість) чи структурну ознаку, таку як слабку протравлюваність цієї ділянки. Водночас точно визначити вміст вуглецю за допомогою сучасних методів елементного аналізу (наприклад, за допомогою електронно-зондового рентгеноспектрального мікроаналізу) достатньо складно по причині того, що вуглець – легкий елемент ($Z < 10$) [1].

Для визначення середньої ширини знеуглецьованого прошарку в відпущених наплавках

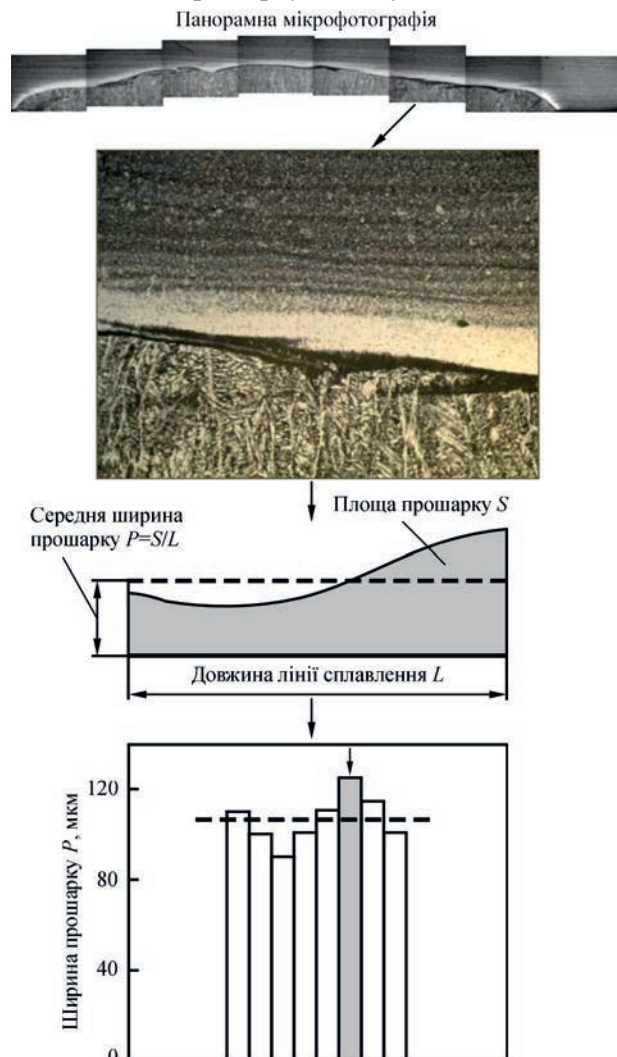


Рис. 4. Схема побудови гістограм (адаптовано з роботи [12])

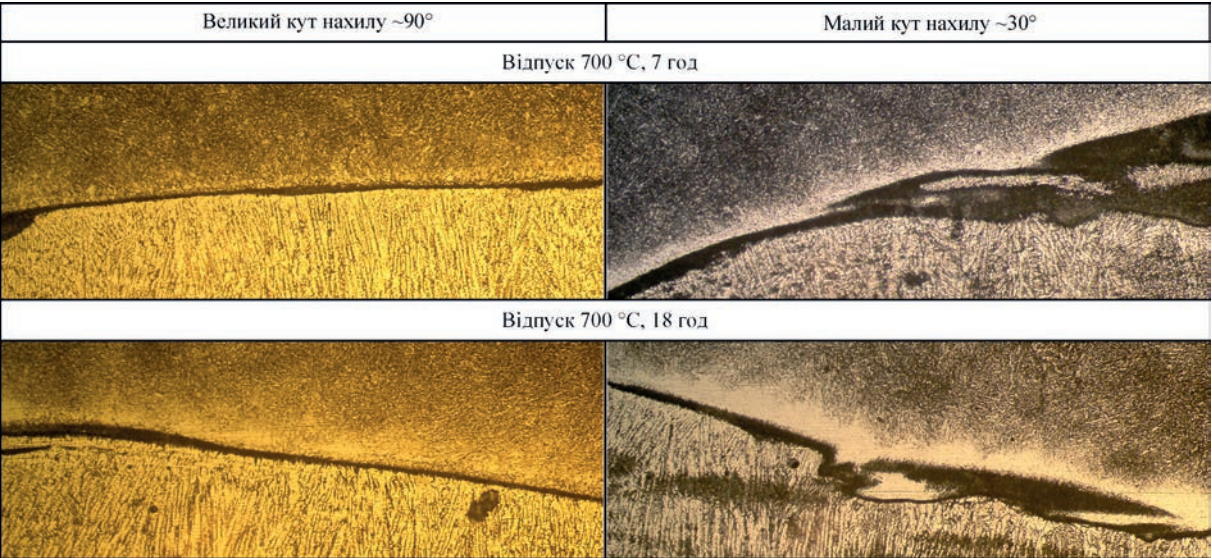


Рис. 5. Приклад мікрофотографій для визначення ширини прошарку в залежності від величини кута нахилу після відпуску, $\times 100$ (шов знизу)

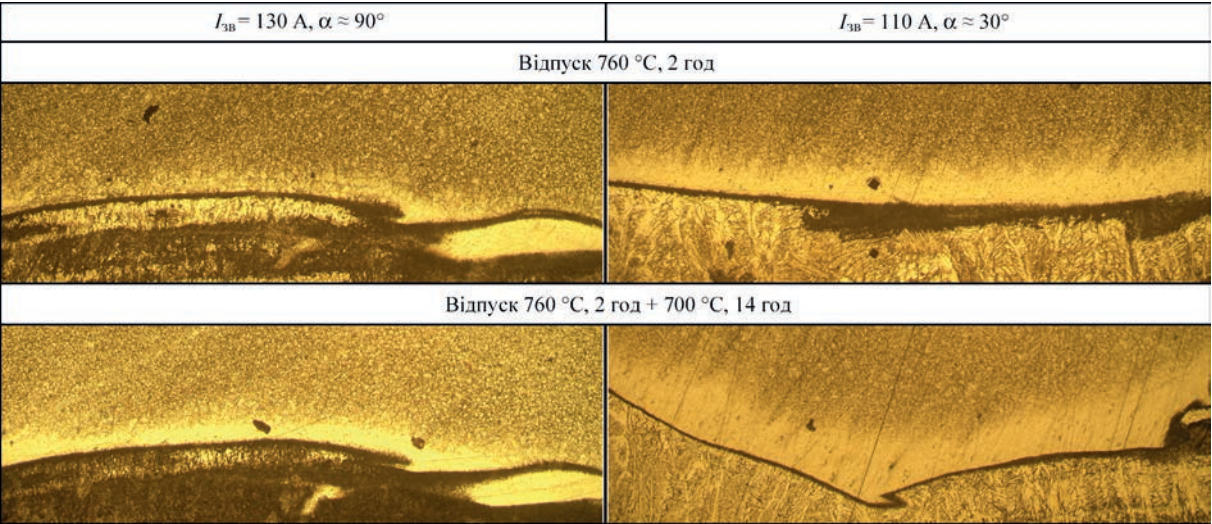


Рис. 6. Приклад мікрофотографій для визначення ширини прошарку в залежності від режиму зварювання після відпуску, $\times 100$ (шов знизу)

виконували панорамні мікрофотографії структури вздовж лінії сплавлення при збільшенні $\times 100$, отримували від 8-9 (для наплавлень) до 16-17 (для зварних з'єднань) мікрознімків в залежності від довжини лінії сплавлення. Вимірювання площі слабопротравлюваної пришовної ділянки та довжини лінії сплавлення виконували за допомогою безкоштовного програмного забезпечення ImageJ [16]. По результатам вимірів будували гістограми для випадку варіювання кута нахилу електрода при напавленні та режиму зварювання. Кожний стовпчик гістограм відображає ширину прошарку на певній мікрофотографії, стовпчики розташовуються у порядку зйомки та нумерації мікрофотографій від лівого краю валика до правого (рис. 4).

Середні значення ширини дифузійного прошарку P для кожного валику (пунктирна лінія на гістограмах) визначалися за формулою

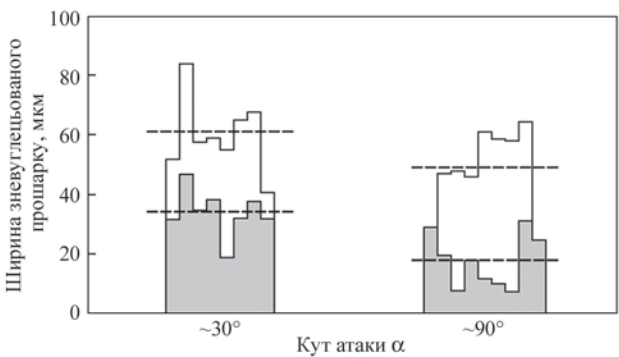


Рис. 7. Гістограми залежності ширини знеуглецьованого прошарку від параметрів кута нахилу електрода в пришовній зоні сталі P91 після відпуску 700 °С, 7 год (заповнений сірим контур) та 700 °С, 18 год (заповнений білим контур)

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i l_i)}{\sum_{i=1}^n l_i},$$

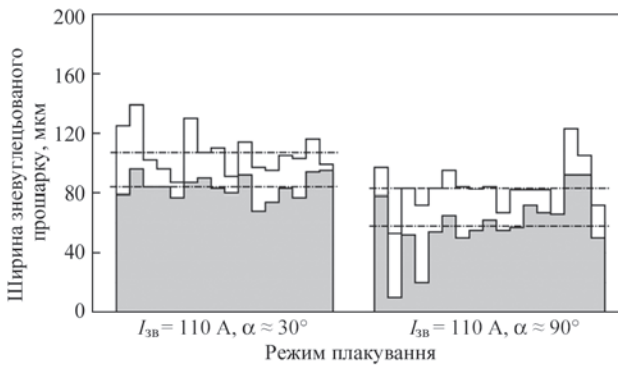


Рис. 8. Гістограми залежності ширини знеуглецьованого прошарку від параметрів режиму зварювання в пришовній зоні сталі Р91 після відпуску 760 °С, 2 год (заповнений сірим контур) та 760 °С, 2 год + 700 °С, 14 год (заповнений білим контур)

де p_i – ширина дифузійного прошарку (мкм) на певній мікрофотографії i (n – загальна кількість мікрофотографій для деякого валика); l_i – довжина лінії сплавлення (мкм) на певній мікрофотографії i .

Результати експериментів та їх аналіз. На рис. 5 приведені приклади мікрофотографій пришовної зони сталі Р91 в наплавленнях в стані після відпуску 700 °С, 7 та 18 год відповідно, на рис. 6 – мікрофотографії зварних з'єднань. На мікрофотографіях можна відзначити помітний діапазон коливання ширини знеуглецьованого прошарку при однаковій температурній витримці. На рис. 7 показано побудовані за описаною вище методикою гістограми ширини знеуглецьованого прошарку в залежності від параметру кута нахилу електрода після відпуску 700 °С, 7 та 18 год, а на рис. 8 – гістограми ширини знеуглецьованого прошарку в залежності від режиму наплавлення в зварному з'єднанні після відпуску 760 °С, 2 год та 760 °С, 2 год + 700 °С, 14 год.

Додатково проводили вимірювання мікротвердості в зварних з'єднаннях в ЗТВ сталі Р91 під серединою другого плакованого валика зверху для обох режимів зварювання (рис. 9). Результати вказують на те, що на режимі з меншим струмом і більшим знеуглецюванням спостерігається помітне зменшення в пришовній зоні, а також в зоні критичних температур між A_{C1} і A_{C3} , в порівнянні з режимом на більшому струмі та з меншим знеуглецюванням.

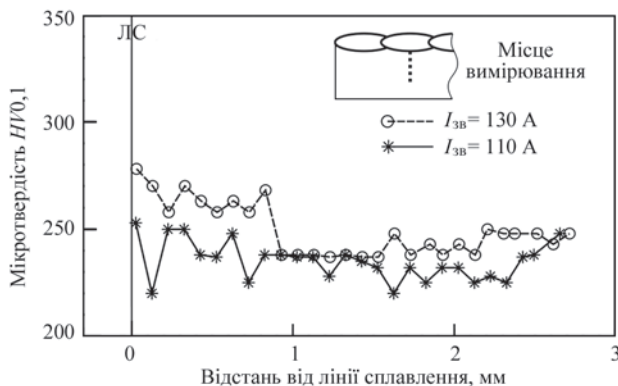


Рис. 9. Мікротвердість в пришовній зоні ЗТВ сталі Р91 після відпуску 760 °С, 2 год + 700 °С, 14 год

Це дає змогу встановити пряме відношення між структурною та механічною характеристиками металу внаслідок дифузії вуглецю в пришовній зоні: зі збільшенням знеуглецювання, видимого на мікрофотографіях, зростає зменшення.

Отримані з гістограм дані повністю узгоджуються з результатами досліджень, викладеними в попередній статті [12]: при збільшенні тепловкладення зменшується швидкість розвитку знеуглецьованого прошарку при відпуску. Це пов'язано з тим, що при температурах високого відпуску і нижче переважним типом дифузії є дифузія по границям зерен. При наплавленні на підвищеному режимі, внаслідок росту первісного аустенітного зерна в пришовній зоні, площа границь зерен на одиницю об'єму стає меншою, ніж в металі з наплавленням на меншому режимі, що обмежує зернограничну дифузію.

Зерногранична дифузія є комплексним процесом, що включає пряму дифузію через решітку зерна, дифузію вздовж границь зерен, розсіювання дифундуючої речовини з границь зерен і послідовного просочування її в решітку зерен навколо границь між зернами [17]. В залежності від переважання одного з цих елементарних процесів можна спостерігати різні дифузійні кінетики (або дифузійні режими). Кожен режим превалює в певній області температур і тривалості витримки при цих температурах, а також залежить від розмірів зерен, параметрів решітки і границь зерен.

На рис. 10 показано два з трьох типів класифікації дифузійних кінетик.

Кінетика типу А. Ця кінетика спостерігається при високотемпературній чи тривалій витримці при підвищеній температурі в матеріалах, що мають малий розмір зерен. В роботі [18] показано, що для реалізації такої кінетики потрібно, щоб дифузійна довжина $\sqrt{Dt}$ (де D – коефіцієнт дифузії у решітці ($\text{м}^2/\text{с}$); t – час від початку дифузії (с)) була тільки трохи більшою, ніж відстань між границями зерен d :

$$\sqrt{Dt} \geq \frac{d}{0,8}.$$

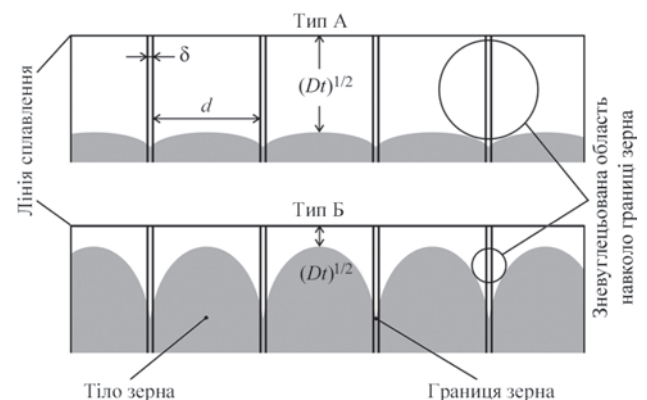


Рис. 10. Дифузійні кінетики типу А і Б (з використанням даних [17])

В такому випадку знеуглецьовані області навколо сусідніх границь зерен перекриваються і фронт знеуглецьовання може захоплювати тіло зерна.

Кінетика типу Б. Ця кінетика характерна для матеріалів після витримки при нижчих температурах чи/і при відносно короткій тривалості витримки в матеріалах з достатньо великим розміром зерен. В таких умовах довжина дифузії $\sqrt{Dt}$ перед тілом зерна може стати набагато меншою, ніж відстань між границями зерен d . Разом з тим ширина приграничних знеуглецьованих областей, що також вираховується за допомогою $\sqrt{Dt}$, може бути значно більшою, ніж ширина границь зерен δ . Тому для кінетики типу Б виконується наступна умова:

$$\delta \ll \sqrt{Dt} \ll d.$$

При цій кінетиці з областей навколо границь зерен відбувається знеуглецьовання в збіднені вуглецем граничні ділянки зерен, де вже пройшла дифузія, однак, на відміну від типу А, знеуглецьовані області навколо сусідніх границь зерен не перекриваються в тілі зерна [17].

При збільшенні розміру зерен кінетика типу А поступово переходить в кінетику типу Б, тому будь-які відхилення в розподілі розміру зерен пришовної зони ЗТВ після зварювання, викликані різним тепловкладенням, матимуть результатом різну швидкість знеуглецьовання. Ці дані вказують на те, що з точки зору процесу стримування знеуглецьовання крупнозерниста структура має переваги над дрібнозернистою. Крупнозерниста структура також має сприятливий вплив на тривалу міцність. Це пояснюється тим, що деформація і руйнування при високих температурах часто відбуваються по границям зерен, які містять велику кількість дефектів (вакансій, дислокацій і т.д.): при підвищених температурах та наявності напружень по ним легко відбуваються елементарні акти ковзання та зародження каверн і мікротріщин, що призводять до декогезії границь зерен [4, с. 346]. Таким чином, якщо при низьких температурах висока щільність границь зерен (при дрібнозернистій структурі) сприяє гальмуванню руху дислокацій і зміцненню сплаву, то при високих температурах, навпаки, висока щільність границь допомагає пришвидшеному знеміцненню полікристалічних металів. Тому більш крупне зерно сприяє підвищенню жароміцності [15, с. 302].

Недоліками крупнозернистої структури в пришовній зоні ЗТВ є знижена пластичність та ударна в'язкість, а в низьколегованих сталях – ще й схильність до утворення тріщин відпускового нагріву. Однак у випадку сталі Р91 повідомлялося, що вона не є схильною до утворення тріщин відпуску [4]. Що стосується ударної в'язкості, то найбільш критичним місцем з'єднань мартенситних і аустенітних сталей є ділянка першого прошарку плакування – в перших наплавлених валиках

відбувається інтенсивне розбавлення та перемішування у різних співвідношеннях розплаву основного металу з електродним. Зокрема, вміст нікелю в перемішаній зоні знижується в напрямку від зони розплавлення до менш легovanого основного металу. В деякій точці на ділянці цього зниження вміст нікелю стає надто низьким, щоб стабілізувати аустеніт при охолодженні до кімнатної температури, а відносно висока легovanість в цій зоні сприяє високій загартовуваності, внаслідок чого там утворюється мартенсит [2]. Зокрема, виконані випробування на ударну в'язкість в першому прошарку обох наплавов – при 110 та 130 А – показали, що KCV в цій ділянці коливалась в межах 30 Дж/см². Проте ця зона не завдавала негативного впливу на інші властивості в стані після зварювання та відпуску – кут загину поперечних зразків становив не менше 100°, а руйнування при випробуваннях на поперечних зразках на статичний розтяг відбувалися по аустенітному основному металу.

Висновки

1. Визначено, що ширина знеуглецьованого прошарку в сталі Р91, плакованій і завареній аустенітним зварювальним матеріалом, що розвивається при відпуску чи високотемпературній експлуатації, може варіюватися при зміні значень кута нахилу електрода: ширина прошарку зменшується при куті, близькому до 90°, та збільшується при зменшенні кута нахилу до 30°. Ширина прошарку на зразках, виконаних з кутом нахилу 30°, більша ніж ширина прошарку на зразках, виконаних з кутом нахилу 90°, після витримки 700 °С, 7 год – в 1,89 разів; після витримки 18 год – в 1,24 рази.

2. Металографічні дослідження та вимірювання твердості вказують на те, що в реальному зварному з'єднанні між мартенситною та аустенітною сталями, плакованому на режимі з підвищеним струмом (до 130 А), після високого відпуску спостерігається зменшене знеуглецьовання та знеміцнення в пришовній зоні ЗТВ мартенситної сталі, ніж у з'єднанні, плакованому на режимі з пониженим струмом (110 А). Ширина прошарку в з'єднаннях, виконаних на струмі 110 А з кутом нахилу 30°, більша ніж ширина прошарку, виконаного на струмі 130 А з кутом нахилу 90°, після витримки 760 °С, 2 год – в 1,45 разів; після додаткової витримки 700 °С, 14 год – в 1,29 разів.

Список літератури/References

1. Lundin, C.D., Khan, K.K., Yang, D. (1995) Effect of carbon migration in Cr–Mo weldments on metallurgical structure and mechanical properties. *Welding Research Council Bulletin*, 407, 1–49.
2. DuPont, J.N. (2012) Microstructural evolution and high temperature failure of ferritic to austenitic dissimilar welds. *International Materials Reviews*, 57(4), 208–234.

3. Dawson, K.E., Tatlock, G.J., Chi, K., Barnard, P. (2013) Changes in precipitate distributions and the microstructural evolution of P24/P91 dissimilar metal welds during PWHT. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 44, 5065–5080.
4. Abe, F., Kern, T.-U., Viswanathan, R. (2008) *Creep-resistant steels*. Woodhead Publishing.
5. Helander, T., Andersson, H.C.M., Oskarsson, M. (2000) Structural changes in 12–2.25% Cr weldments – an experimental and theoretical approach. *Materials at High Temperatures*, 17(3), 389–396.
6. Brett, S.J. (2004) Type IIIa cracking in 1/2CrMoV steam pipework systems. *Science and Technology of Welding and Joining*, 9(1), 41–45.
7. Frei, J., Alexandrov, B.T., Rethmeier, M. (2019) Low heat input gas metal arc welding for dissimilar metal weld overlays part III: hydrogen-assisted cracking susceptibility. *Welding in the World*, 63, 591–598.
8. You, Y., Shiue, R.K., Shiue, R.H., Chen, C. (2001) The study of carbon migration in dissimilar welding of the modified 9Cr–1Mo steel. *Journal of Materials Science Letters*, 20, 1429–1432.
9. Karthick, K., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V., Gourav Rao, A. (2018) Tensile properties variation across the dissimilar metal weld joint between modified 9Cr–1Mo ferritic steel and 316LN stainless steel at RT and 550 °C. *Metallography, Microstructure and Analysis*, 7, 209–221.
10. Urzysnicok, M., Jachym, R., Kwiecinski, K. et al. (2013) Application of EPRI87 in dissimilar welding austenitic-martensitic welded joints of TEMPALLOY AA-1 and T92 steel grades. *Advances in Materials Technology for Fossil Fuel Power Plants: Proceedings of the 7th International Conference, Waikoloa, Hawaii, USA*, 992–1005.
11. Coleman, K., Gandy, D. (2007) Alternative filler materials for DMWs involving P91 materials. *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants: Proceedings of the 5th International Conference, Marco Island, Florida, USA*, 940–967.
12. Nimko, M.O. (2021) Influence of welding parameters on decarburization in heat affected zone of dissimilar weldments after post weld heat treatment. *Archives of Materials Science and Engineering*, 112(1), 23–31.
13. Defects/imperfections in welds – reheat cracking. *Job knowledge for welders*, 48, TWI, July 2000, 4 p. (www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-imperfections-in-welds-reheat-cracking-048).
14. Tamura, M., Abe, F., Shiba, K. et al. (2013) Larson–Miller constant of heat-resistant steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(6), 2645–2661.
15. Лактин Ю.М. (1984) *Металловедение и термическая обработка*. Москва, Металлургия.
16. Lakhtin Yu.M. (1984) *Metals science and heat treatment*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
17. <https://imagej.nih.gov/ij/>
18. Mehrer, H. (2007) *Diffusion in Solids. Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Springer-Verlag.
19. Belova, I.V., Murch, G.E. (2001) The transition from Harrison type-B to type-A kinetics in grain-boundary tracer diffusion. *Philosophical Magazine A*, 81(10), 2447–2455.

INFLUENCE OF WELDING MODES ON DECARBURIZATION IN THE HAZ OF R91 STEEL IN WELDED JOINTS OF DISSIMILAR STEELS AFTER HIGH-TEMPERATURE TEMPERING

M.O. Nimko, V.Yu. Skulskii, A.R. Gavrik, I.G. Osipenko

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

Carbon migration from the lower-alloyed to the higher-alloyed steel takes place in welded joints of dissimilar steels, as a result of the difference in carbon chemical potential after tempering and in high-temperature service. Decarburization in the HAZ near-weld zone of the lower-alloyed steel can lead to formation of service defects and subsequent failure. From mass transfer theory it is known that in polycrystalline bodies the diffusion of interstitial elements, in particular carbon, occurs most rapidly along the grain boundaries. Theoretically, reduction of carbon diffusion can be achieved by increasing the grain dimensions in the HAZ near-weld zone that will lead to reduction of the overall grain boundary area per a unit of volume in this zone. This work is a study of the influence of the angle of electrode inclination and welding current at deposition of austenitic metal on R91 steel on the width of the decarburized layer, forming at subsequent tempering at the temperature of 700 and 760 °C. It is shown that the resultant decarburized layer becomes narrower with increase of the angle of electrode inclination and deposition current. 18 Ref., 10 Fig.

Keywords: carbon diffusion, dissimilar steel joint, HAZ, decarburized interlayer, grain boundaries

Надійшла до редакції 17.01.2022

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031

Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/twj
Передплатний індекс 21791



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tlnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693

ОСОБЛИВОСТІ МІКРОСТРУКТУРИ З'ЄДНАНЬ ЗАЕВТЕКТОЇДНОЇ РЕЙКОВОЇ СТАЛІ МАРКИ AREAL-136HE-X ПРИ КОНТАКТНО-СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

В.І. Швець¹, О.В. Дідковський¹, Є.В. Антіпін¹, І.В. Зяхор¹, Л.М. Капітанчук¹, Wang Qichen²

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

²CIMC Offshore Engineering Institute Company Limited Yantai, Shandong, P.R. China. E-mail: qichen.wang@cimc-raftles.com

Досліджено мікроструктуру та властивості з'єднань рейок із заевтектоїдної сталі марки AREAL 136HE-X, отриманих технологією контактного стикового зварювання. Встановлено, що в термодформаційних умовах зварювання перерозподіл вуглецю супроводжується утворенням в мікроструктурі часток з виділеннями вуглецю і зниженням вмісту вуглецю в матриці. Кількість часток збільшується у напрямку стику, найбільша концентрація спостерігається у приконтakтному шарі. Згідно з розподілом твердості в зоні великого зерна, на відміну від з'єднань доевтектоїдних рейок, твердість у порівнянні з основним металом незначно знижується – HV 3900 МПа і HV 4000 МПа відповідно. Причина цього полягає у відсутності в мікроструктурі вільних карбідів. Особливості мікроструктури не впливають істотно на результати випробувань на статичний вигин і відповідають вимогам вітчизняного та європейського стандартів. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: контактнo-стиковe зварювання, заевтектоїдні рейкові сталі, перерозподіл вуглецю, розподіл твердості, статичний вигин

Вступ. Складні умови експлуатації рухомого складу залізничного транспорту вимагають вдосконалення міцнісних характеристик як самих рейок, так і їх з'єднань. Це стало причиною появи численних розробок, мета яких полягала в отриманні рейкових сталей, стійких до збільшеного осьового навантаження на колію і циклічних навантажень, зумовлених зростанням швидкості руху. Можливості термічної обробки доевтектоїдних рейкових сталей вичерпані. Одним із шляхів підвищення якості рейок розглядається використання заевтектоїдних сталей з вмістом вуглецю більше 0,8 %. Передбачається підвищення зносостійкості за рахунок карбідної структурної складової на межах первинних аустенітних зерен.

При спорудженні залізничних колій найбільш поширеним технологічним процесом з'єднання рейок є контактне стикове зварювання (КСЗ) [1]. КСЗ рейок повністю автоматизоване і використовується в усьому світі як спосіб, який забезпечує високу якість та продуктивність процесу. Збільшення вмісту вуглецю в складі рейкової сталі вимагало вдосконалення технології КСЗ. Відомі роботи [2, 3] з розробки способів та оптимізації режимів КСЗ заевтектоїдних рейок, що проводилися компанією Nippon Steel & Sumitomo Metal (Японія). Вибір нею режимів здійснювався з урахуванням зіставлення розподілу твердості з характером абразивного зносу металу в межах з'єднання.

В Україні КСЗ рейок виконується з застосуванням стаціонарних та мобільних машин конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Для зварюван-

ня рейок із заевтектоїдним вмістом вуглецю використовують сертифіковані програми пульсуючого оплавлення, згідно з якими регулювання енерговкладання здійснюється за рахунок зміни тривалості оплавлення та значення зварювального струму [4, 5].

Заевтектоїдні сталі містять вуглець у кількості від 0,8 до 2,14 %. Їх структура являє собою сорбіт загартування з виділеннями карбідів на межах первинних аустенітних зерен, присутність яких в структурі збільшує твердість та зносостійкість [6]. Підвищення вмісту вуглецю в рейкових сталях обмежується можливістю утворення небезпечної карбідної сітки.

В рівноважних умовах вуглець в сталі може знаходитися в твердому розчині на основі α - та γ -заліза, у складі карбідів, на скупченнях дислокацій, на міжфазних і внутрішньофазних межах. В силу високої дифузійної рухливості при високих температурах, в процесі термічної та термомеханічної обробки можливий перерозподіл вуглецю. Питання термодинаміки і механізму розпаду цементиту та прискореного перенесення вуглецю до дефектів структури під час пластичної деформації розглянуто в монографії [7]. Перерозподіл вуглецю між структурними складовими сталі, а також вихід на дефекти структури в умовах високих температур і пластичної деформації розглянуто в роботі [8]. Дослідження еволюції структури показало, що в мартенситній сталі має місце збільшення кількості вуглецю на дефектах структури при зменшенні водночас в α -залізі. В сталі з бейнітною структурою кількість вуглецю зро-

Швець В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-4653-7453>, Дідковський О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5268-5599>,

Антіпін Є.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3297-5382>, Зяхор І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7780-0688>

© В.І. Швець, О.В. Дідковський, Є.В. Антіпін, І.В. Зяхор, Л.М. Капітанчук, 2022

стає в α -залізі, водночас зменшується в γ -залізі і в частках цементиту, що знаходяться в обсязі пластин бейніту, крім того, має місце перенесення вуглецю в дефекти кристалічної структури. Відомо [9], що експлуатація залізничних рейок супроводжується суттєвим перерозподілом вуглецю у тонкому поверхневому шарі. Якщо у вихідному стані основний вміст вуглецю зосереджено у складі цементиту Fe_3C , то після тривалої експлуатації рейок підвищений вміст вуглецю визначено на дислокаціях, межах зерен та субзерен.

В термодформаційних умовах КСЗ існують передумови для перерозподілу вуглецю. Мета роботи полягала у визначенні особливостей мікроструктури з'єднань заєвтектоїдних рейкових сталей з підвищеним вмістом вуглецю при КСЗ.

Методика та обладнання. Проведено зварювання заєвтектоїдних рейок марки AREAL 136HE-X виробництва корпорації Nippon Steel (Японія) на машині для контактної стикового зварювання K1000 з використанням пульсуючого оплавлення. Після оптимізації режиму рекомендовані параметри мають знаходитись у межах: час зварювання – 70...90 с, зварювальний струм – 360...390 А, припуск на оплавлення – 10...14 мм, величина осадки – 11...14 мм. Марочний склад та результати спектрального аналізу поставленої партії рейок наведено в табл. 1.

Макроструктуру з'єднань виявляли відповідно до вимог ГОСТ P51685-2013 на повнопрофільному темплеті, вирізаному у поперечному напрямку. Травлення шліфованих зразків здійснювалось водним розчином хлорного заліза. Мікроструктуру виявляли травленням попередньо полірованих зразків у 4%-му спиртовому розчині HNO_3 . Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі NEOPHOT 32, оснащеному цифровим фотоапаратом. Для аналізу мікроструктури та визначення хімічного складу структурних складових використовували Оже-мікрозонд JAMP 9500F фірми «JEOL» (Японія) із встановленим на ньому рентгенівським енергодисперсійним спектрометром JNCA Penta FET x3 фірми «Oxford Instrument». Енергія первинного електронного пучка становила 10 кеВ при струмі 0,5 нА для методів РЕМ та РСМА та струмі 10 нА для методу Оже-електронної спектроскопії. Спектри Оже реєструвалися з енергетичною роздільною здатністю $\Delta E/E = 0,6\%$. Перед дослідженнями поверхня зразків піддавалася очищенню безпосередньо в камері аналізу приладу шляхом трав-

лення іонами аргону Ar^+ з енергією 1 кеВ протягом 10 хв. Швидкість травлення по контрольному зразку-свідку SiO_2 становила 4 нм/хв. Вакуум у камері аналізу знаходився в межах $5 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ Па.

Твердість за Віккерсом вимірювали на твердомірі NOVOTEST TC-GPB з навантаженням 292,4 Н (30 кг). Розподіл твердості у з'єднанні досліджували на відстані 5 мм від поверхні катання рейки.

Результати досліджень та обговорення. Металографічні дослідження показали, що макроструктура з'єднання подібна до такої доєвтектоїдних рейок і складається із зони шва, до якої примикає зона великого зерна, потім слідує зона дрібного зерна, неповної перекристалізації та відпуску (рис. 1). Ширина зони термічного впливу досліджуваного з'єднання складала 30 мм. Аналіз розподілу твердості показав (рис. 2), що в зоні великого зерна, на відміну від з'єднань доєвтектоїдних рейок, твердість у порівнянні з основним

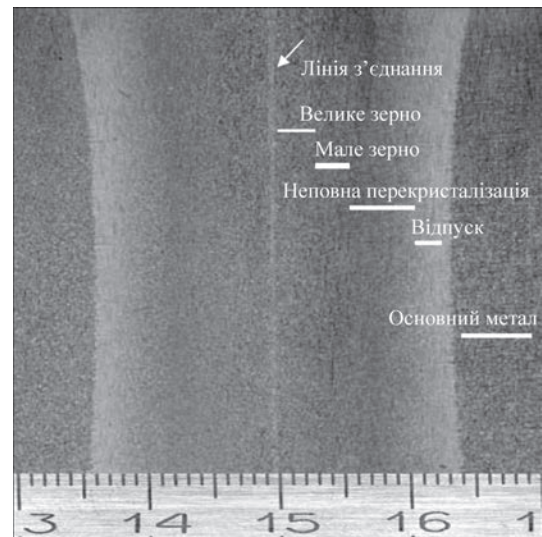


Рис. 1. Макроструктура з'єднання рейок сталі марки AREAL 136HE-X ($\times 25$)

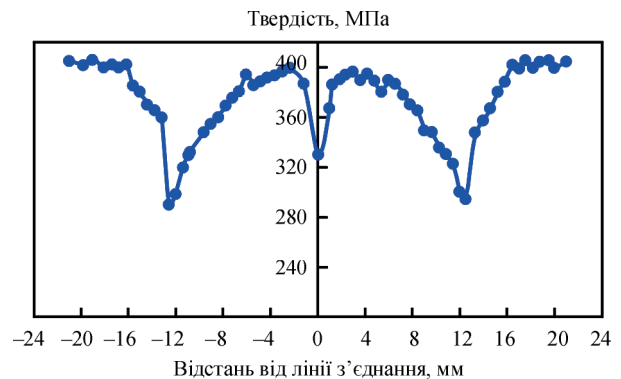


Рис. 2. Розподіл твердості по Віккерсу в з'єднанні заєвтектоїдних рейкової сталі марки AREAL-136HE-X. Навантаження 30 кг

Таблиця 1. Хімічний склад рейкової сталі AREAL 136 HE-X (мас. %)

Елемент	C	Mn	Si	V	Ti	Cr	P	Al	S
Згідно сертифікату	0,99...1,00	0,69...0,71	0,50...0,52	-	-	0,21...0,22	-	0,005	0,02
Згідно з результатами спектрального аналізу	0,97	0,69	0,49	0,01	0,008	0,21	0,012	$\leq 0,01$	0,008

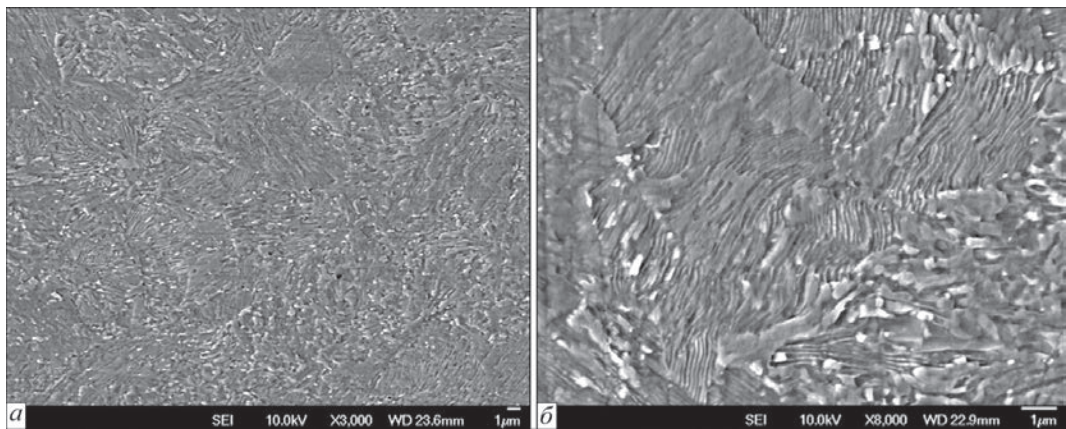


Рис. 3. Мікроструктура заевтектоїдної сталі марки AREAL 136HE-X: а – $\times 3000$; б – $\times 8000$

металом незначно знижується – $HV\ 3900\ \text{МПа}$ та $HV\ 4000\ \text{МПа}$ відповідно.

Дослідження мікроструктури показало, що основний метал являє собою сорбіт гартування (рис. 3). Розмір колоній сорбіту близько $10\ \mu\text{м}$. Міжпластинчата відстань у сорбіті оцінно $0,14\ \mu\text{м}$. Необхідно відзначити, що пластини цементиту в сорбіті деформовані та подрібнені.

При аналізі мікроструктури встановлено, що в основному металі вздовж границь зерен спостерігається структурна складова з вмістом вуглецю $44,5\ \text{ат. \%}$, решта залізо. Товщина її становить десяти частки мікрона (рис. 4). Утворення суцільної карбідної сітки не спостерігається. Зустрічаються

хаотично розподілені в матриці частки, у складі яких зафіксовано $68,4\ \text{ат. \%}$ вуглецю.

Враховуючи можливу похибку при Оже-спектральному методі аналізу можна припустити, що на межах зерен спостерігається доевтектоїдна карбідна фаза, в структурі сталі присутні частки з виділеннями вуглецю. Необхідно відзначити, що співвідношення вуглецю і заліза в карбідній фазі не відповідає стехіометричному в цементиті: $75\ \text{ат. \% залізо} - 25\ \text{ат. \% вуглець}$.

Забрудненість неметалічними включеннями незначна. Це насамперед безсистемно розташовані в матриці продукти розкислення – оксиди алюмінію з домішками кальцію, кремнію, маг-

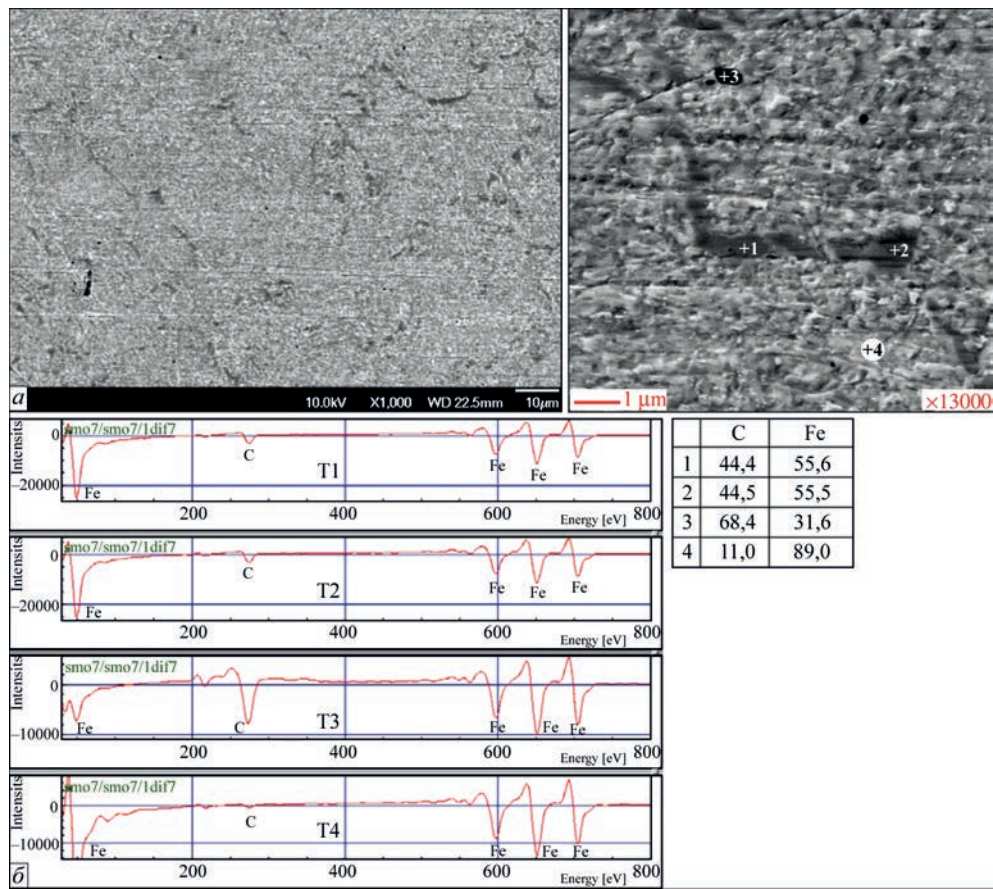


Рис. 4. Виділення карбідної фази на межах зерен заевтектоїдної рейкової сталі марки AREAL 136 HE-X: а – мікроструктура; б – Оже-спектри і результати Оже-спектрального аналізу (ат. %)

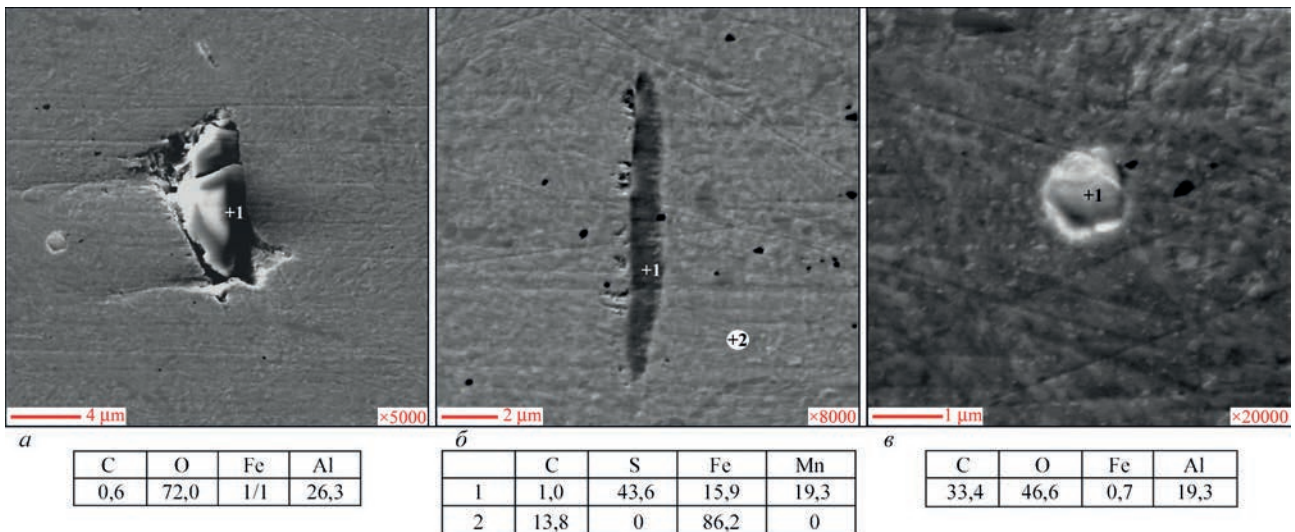


Рис. 5. Неметалеві включення заевтектоїдної сталі марки AREAL 136HE-X та результати Оже-спектрального аналізу (ат. %): а – оксид алюмінію; б – сульфід; в – карбооксид алюмінію

Таблиця 2. Склад неметалічних включень в сталі AREAL 136HE-X (ат. %)

Номер п/п	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe
1	0,44	63,30	2,16	25,82	3,46	3,30	0,68	0,84
2	1,09	61,36	3,05	24,98	3,64	2,66	1,35	1,86
3	1,14	61,31	1,65	27,57	1,55	0,97	0,98	4,83
4	1,57	60,75	2,64	23,57	4,09	2,97	1,07	3,34
5	1,54	62,41	0,82	27,45	2,32	1,55	0,17	3,74
6	1,35	57,03	0,67	25,00	2,12	2,00	0,73	11,08

нію (табл. 2, рис. 5, а). Зустрічаються витягнуті вздовж напрямку прокату сульфідні довжиною до 10 мкм (рис. 5, б) і дисперсні розміром менше 1 мкм карбооксиди алюмінію, не зазначені раніше у структурі рейкових сталей (рис. 5, в).

Дослідження металу зони термічного впливу показало, що мікроструктура являє собою пластинчатий перліт різного ступеня дисперсності (рис. 6, а). Винятком є зона відпуску, де відбувається коагуляція сорбітного цементиту, наслідком чого є зниження твердості на цій ділянці (рис. 6, б). На ділянці перекристалізації по межах первинних аустенітних зерен зустрічаються виділення доевтектоїдного фериту товщиною менше 1 мкм (рис. 6, в). Наявність доевтектоїдного фериту є, вочевидь, наслідком зменшення вмісту вуглецю в аустеніті, що формується в процесі зварювання, нижче евтектоїдного.

По лінії з'єднання в результаті збіднення приконтального шару вуглецем при оплавленні торців рейок під час зварювання формується смуга з доевтектоїдним феритом на межах первинних аустенітних зерен (рис. 7). Ширина смуги близько 300 мкм. Розмір зерен первинного аустеніту за шкалою ASTM відповідає балу 2-3. Міжпластинчаті відстані в сорбіті оцінюють становить близько 0,17 мкм, що значно більше порівняно з такою на ділянці великого зерна – 0,10 мкм (рис. 6, г). Розмір міжпластинчатої відстані є основним чинником, що обумовлює рівень твердості

сталі. Відповідно до цього по лінії з'єднання спостерігається значне зниження твердості.

Незважаючи на існуючі передумови, карбіди на межах первинних аустенітних зерен у з'єднанні не виявлені, збільшилася кількість і розміри хаотично розподілених глобулярних часток, що подібні до часток з виділеннями вуглецю в основному металі (рис. 8, а). Згідно з результатами Оже-спектрального аналізу досліджувані частки містили 84,2...92,8 ат. % С, решта залізо (рис. 8, б). Кількість їх збільшується у напрямку стику, найбільша концентрація спостерігається у приконтному шарі.

Міжпластинчаті відстані в сорбіті визначає твердість сталі – зменшення її веде до збільшення твердості. В основному металі і на ділянці великого зерна міжпластинчаті відстані складає 0,14 та 0,10 мкм відповідно. Проте твердість на ділянці великого зерна менша за таку основного металу – 3900 та 4000 МПа відповідно. Очевидно, це пов'язано з наявністю в основному металі карбідної фази на межах первинних аустенітних зерен і відсутністю її в структурі з'єднання.

Фрактографічними дослідженнями встановлено, що на поверхні зламу з'єднання вуглець присутній перш за все навколо неметалічних включень (рис. 9, а, б). Необхідно відзначити наявність утворень системи С-N-O, що примикають до вуглецю і містять

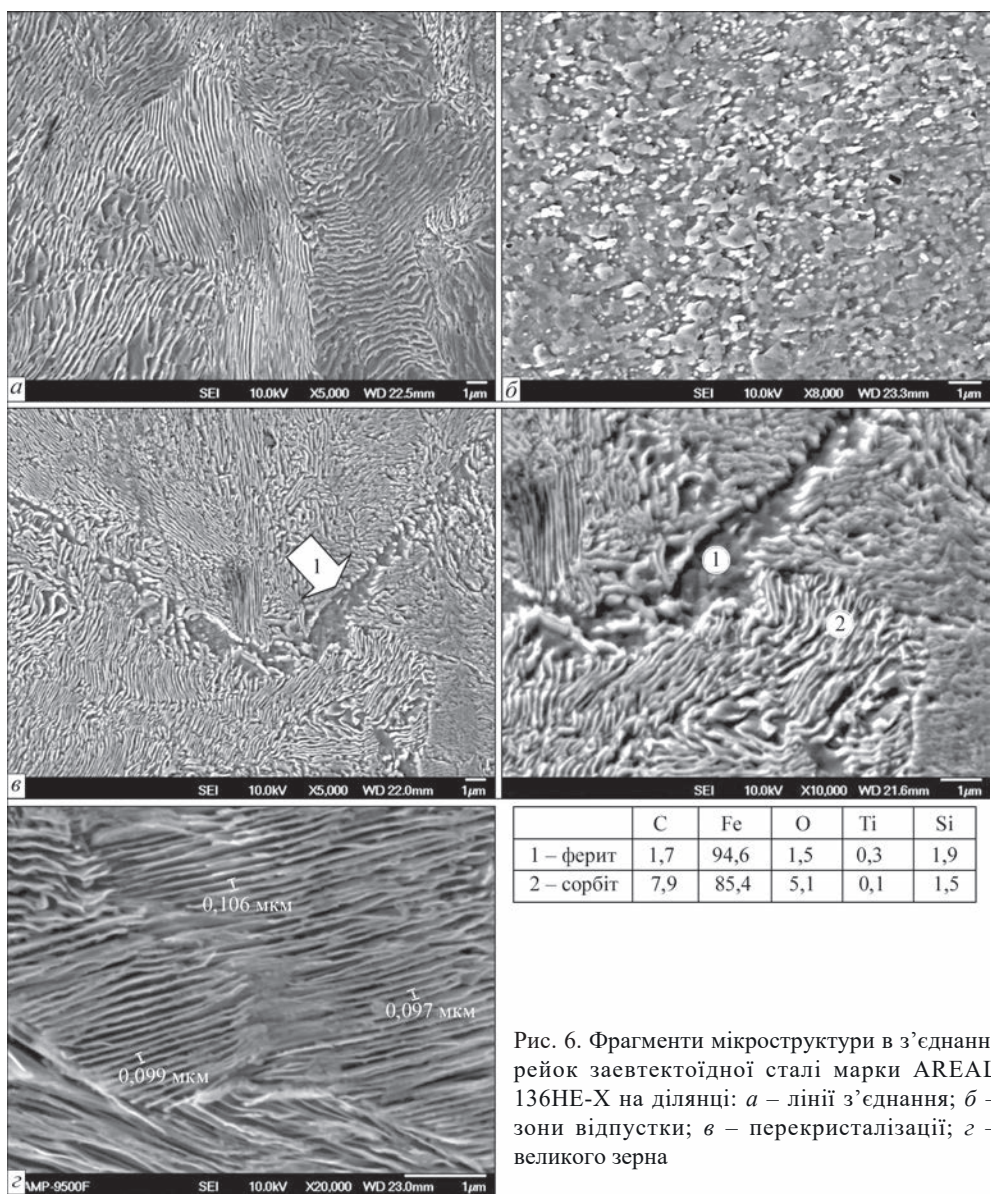


Рис. 6. Фрагменти мікроструктури в з'єднанні рейок заевтектоїдної сталі марки AREAL 136HE-X на ділянці: а – лінії з'єднання; б – зони відпустки; в – перекристалізації; г – великого зерна

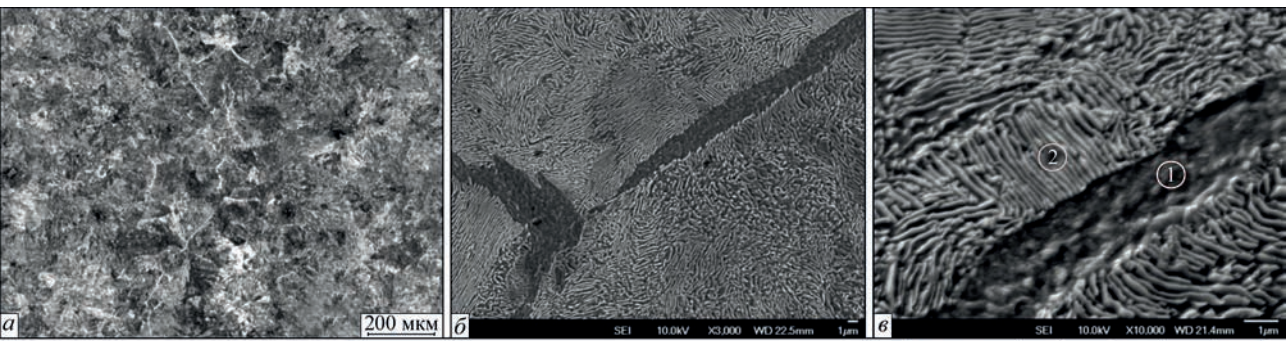


Рис. 7. Лінія з'єднання рейок з заевтектоїдної сталі марки AREAL 136HE-X: а, б – мікроструктура (×100, ×3000); в – результати Оже-спектрального аналізу (ат. %)

54,91...61,36 ат. % вуглецю; 14,65 ат. % азоту; 8,39 ат. % кисню (рис. 9, в).

Вважається, що вуглець в структурі вуглецевих сталей і чавунів присутній у складі хімічних сполук (карбідів), твердого розчину заліза, а також у вигляді основної алотропної модифікації – графіту. Однак в дослідженнях низки ав-

торів на основі експериментальних даних показано, що у сплавах системи Fe-C вуглець може знаходитися у станах, які не відповідають згаданим вище варіантам [10]. Зокрема, у зварних з'єднаннях виявлені фулерени – молекулярна форма вуглецю [11]. Отримані результати фрактографічних досліджень дають підстави припустити існу-

собою пластинчастий перліт різного ступеня дисперсності. Винятком є зона відпуску, де відбувається коагуляція сорбітного цементиту. По лінії з'єднання в результаті збіднення приконтактного шару вуглецем при оплавленні торців рейок під час зварювання формується смуга з доєвтектоїдним феритом на межах первинних аустенітних зерен. Доєвтектоїдний ферит в незначній кількості спостерігається також в зоні перекристалізації. Карбіди на межах первинних аустенітних зерен у з'єднанні не виявлені. В той же час в мікроструктурі спостерігаються глобулярні частки з високим вмістом вуглецю.

2. Результати дослідження мікроструктури свідчать, що в термдеформаційних умовах КСЗ має місце перерозподіл вуглецю, наслідком якого є перенесення його до дефектів структури. Вміст вуглецю в матриці при цьому знижується і перекристалізація в металі ЗТВ проходить подібно до доєвтектоїдних рейкових сталей.

3. Дослідження розподілу твердості показало, що в зоні великого зерна, на відміну від з'єднань доєвтектоїдних рейок, твердість у порівнянні з основним металом знижується – HV 3900 МПа та HV 4000 МПа відповідно. Причиною цього є відсутність в мікроструктурі зони великого зерна, карбідної фази на межах первинних аустенітних зерен, на відміну від основного металу.

4. Результати випробувань з'єднань заєвтектоїдної рейкової сталі марки AREAL-136HE-X на статичний вигин відповідають вимогам вітчизняного та європейського стандартів. Використання КСЗ для отримання якісних з'єднань рейок заєвтектоїдного складу визнано перспективним.

Список літератури

1. Кучук-Яценко С.И. (1992) *Контактная стыковая сварка оплавлением*. Киев, Наукова думка.
2. Fujil Mitsuru, Nakanowatari Hiroaki, Narial Kiyoshi (2015) *Rail Flash-Butt Welding*. Jfe Technical Report № 20 March. <https://WWW.jfe-steel.co.jp>
3. Сайта Кендзи, Фукути Хироси, Цуцуми Ясунобу (2014) Способ стыковой сварки оплавлением рельсовой стали. *Нипонстил Энд Сумитомо Металл Корпорейшн № 216.012 A172/20.02.2014*. <https://edrid.ru/en/rid/216/012/a172.html>
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, **11-12**, 29–44. DOI: doi:10.15407/as2018.11-12.03
5. Кучук-Яценко С.И., Дідковський О.В., Богорський М.В. та ін. (2002) *Спосіб контактного стикового зварювання оплавленням*. Україна Пат. 46820 6B23K11/04, C2, РФ Пат. № 2222415 від 2003, США Пат. US № 6.294.752 від 2001, Великобританія Пат. GB235725.9A від 20.06.01, КНР Пат. ZL00101672/5 від 2004.
6. Гуляев А.П. *Металлознание. Підручник для вузів*. Москва, Металлургия, 1977.
7. Гаврилюк В.Г. (1987) *Розподіл вуглецю в сталі*. Київ, Наукова думка.
8. Aksenova, K.V., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F. et al. (2017) Carbon redistribution under deformation of steels with bainite and martensite structures. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, **60(7)**, 544–548. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-7-544-548>
9. Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Ф. и др. (2017) Перераспределение углерода в структуре рельсовой стали после длительной эксплуатации. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*, **4**, 22, УДК 669.539.382.17 <https://cyberleninka.ru/article/n/pereraspredelenie-ugleroda-v-strukture-relsovoy-stali-po>
10. Белоус М.В., Новожилов В.Б., Шаталова Л.А., Шейко Ю.П. (1995) Распределение углерода по состояниям в отпущенной стали. *ФММ*, **79**, **4**, 128–137.
11. Закиричная М.М., Кузеев И.Р., Ткаченко О.И. (1999) Распределение фуллеренов по зонам сварного соединения. *Сварочное производство*, **11**. <http://library.nuft.edu.ua/ebook/file>
12. *Рейки нові зварені для залізниць*. ТУ У 27.1-40081293-002:2016. – Дніпропетровське НКТБ КГ філії «НДКТИ» АТ «Укрзалізниця».
13. DIN EN 14587-2:2009 (E). *Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant* URL: <https://www.en-standard.eu/din-en14587-2-railway-applications-track-flash-butt-welding-of-rails-part-2-new-r220-r260-r260mn-and-r350ht-grade-railsby-mobile-welding-machines-at-sites-other-than-a-fixed-plant>

References

1. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1992) *Flash-butt welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Fujil Mitsuru, Nakanowatari Hiroaki, Narial Kiyoshi (2015) *Rail Flash-Butt Welding*. Jfe Technical Report No. 20, March. <https://WWW.jfe-steel.co.jp>
3. S. Kendji, F. Hiroshi, T. Yasunobu (2014) Method of flash-butt welding of rail steel. *Nippon Steel and Sumitomo Metal Corp. No. 216.012 A172/20.02.2014*. <https://edrid.ru/en/rid/216/012/a172.html>
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, **11-12**, 29–44. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Bogorsky, M.V. et al. (2002) *Flash-butt welding*. Ukraine Pat. 46820 6B23K11/04, C2, Russia Pat. 2222415 of 2003, US Pat. 6.294.752 of 2001, Great-Britain Pat. GB235725.9A of 20.06.01, China Pat. ZL00101672/5, of 2004.
6. Gulyaev, A.P. (1977) *Metals science: Manual for Higher Education Inst.*, Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. Gavrylyuk, V.G. (1987) *Distribution of carbon in steel*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
8. Aksenova, K.V., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F. et al. (2017) Carbon redistribution under deformation of steels with bainite and martensite structures. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, **60(7)**, 544–548 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-7-544-548>.
9. Yuriev, A.A., Ivanov, Yu.F., Gromov, V.F. et al. (2017) Redistribution of carbon in structure of rail steel after long operation. *Vestnik SibGIU*, **4**, 22, UDK 669.539.382.17 [in Russian] <https://cyberleninka.ru/article/n/pereraspredelenie-ugleroda-v-strukture-relsovoy-stali-po>
10. Belous M.V., Novozhilov, V.B., Shatalova, L.A., Shejko, Yu.P. (1995) *Distribution of carbon by state in tempered steel*, **79(4)**, 128–137 [in Russian].
11. Zakirpichnaya, M.M., Kuzeev, I.R., Tkachenko, O.I. (1999) Distribution of fullerenes by zones of welded joint. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11** [in Russian]. <http://library.nuft.edu.ua/ebook/file>
12. TU U 27.1-40081293-002:2016. *New welded rails for railways*. Dnipro, NDKTI Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].
13. DIN EN 14587-2:2009 (E). *Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Pt 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant* URL: <https://www.en-standard.eu/din-en14587-2-railway-applications-track-flash-butt-welding-of-rails-part-2-new-r220-r260-r260mn-and-r350ht-grade-railsby-mobile-welding-machines-at-sites-other-than-a-fixed-plant>

FEATURES OF MICROSTRUCTURE OF BUTT JOINTS OF HYPEREUTECTOID AREAL-136HE-X RAIL STEEL IN FLASH-BUTT WELDING

V.I. Shvets¹, O.V. Didkovsky¹, Ye.V. Antipin¹, I.V. Zyakhov¹, L.M. Kapitanchuk¹, Wang Qichen²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²CIMC Offshore Engineering Institute Company Limited Yantai, Shandong, P.R. China. E-mail: qichen.wang@cimc-raffles.com

The microstructure and properties of butt-joints of rails from hypereutectoid Areal 136HE-X steel produced by the flash-butt welding technology were investigated. It was found that under thermal and deformation conditions of welding, carbon redistribution is accompanied by the formation of particles in the microstructure with carbon precipitation and a decrease in carbon content in the matrix. A number of particles grow in the direction of the butt and their highest concentration is observed in the near-contact layer. According to the distribution of hardness in the zone of a coarse grain, in contrast to the butts of hypoeutectoid rails, as compared to the base metal, the hardness is slightly reduced – HV 3900 MPa and HV 4000 MPa, respectively. This is caused by the absence of free carbides in the microstructure. The features of microstructure do not significantly affect the results of tests on static bending and meet the requirements of domestic and European standards. 13 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: flash-butt welding, hypereutectoid rail steels, carbon redistribution, hardness distribution, static bending

Надійшла до редакції 27.01.2022

XI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах

12–16 вересня 2022 р., Одеса, готель «Аркадія»
Голова програмного комітету академік І.В. Кривцун



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 серпня 2022 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць десяти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/mmw>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.08.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 05.09.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 12.09.2022 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11,
м. Київ, 03150, Україна
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/ukr/mmi2022>



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

III МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

12–16 вересня 2022

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.08.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 05.09.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 12.09.2022 р.

ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50
journal@paton.kiev.ua
posypaiko.yurii@gmail.com
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2022>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БІФІЛЯРНОГО ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ІЗ ЗРІВНЯЛЬНИМ ДРОТОМ

Ю.М. Ланкін, О.П. Бондаренко, В.Г. Тюкалов, В.Г. Соловійов, І.Ю. Романова

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

При біфілярному електрошлаковому зварюванні порівняно з канонічною схемою з двома електродами суттєво змінюється траєкторія протікання струму у шлаковій ванні і, як наслідок, кардинально змінюється положення зон тепловиділення, електромеханічних сил, що діють на розплавлені шлак та метал. Експерименти показали, що при біфілярному електрошлаковому зварюванні істотно зменшується проплавлення кромок металу виробу, що зварюється, стає можливим зменшення зварювального зазору, що дозволяє при тій же потужності збільшувати швидкість зварювання, істотно підвищується коефіцієнт потужності $\cos \phi$ з 0,67 до 0,9. Включення зрівняльного дроту між середньою точкою вихідної обмотки живильного трансформатора і виробом, що зварюється, забезпечує стійкість процесу електрошлакового зварювання за біфілярною схемою підключення джерела живлення. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, біфілярна схема живлення, проплавлення кромок, стійкість процесу, коефіцієнт потужності

Вступ. Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) виконується із застосуванням однієї, двох, трьох і більше електродних дротів. У двоелектродних апаратах електродні дроти підключаються до джерела живлення паралельно за схемою електрод-зварювальний виріб. Таке підключення вважається канонічним. При електрошлаковому переплаві (ЕШП) двома електродами широкого поширення набула біфілярна схема підключення електродів до джерела живлення [1–5]. Біфілярний ЕШП має певні переваги перед ЕШП із паралельно підключеними електродами. Біфілярне ЕШЗ дротяними електродами в даний час не застосовується. Однак є всі підстави вважати, що воно має навіть більше переваг перед біфілярним ЕШП. Оскільки площа перерізу плавких електродів у ЕШЗ та ЕШП значно відрізняється, істотно відрізняються і теплофізичні процеси, що обумовлюють їх плавлення. При біфілярному ЕШЗ порівняно з канонічною схемою з двома електродами суттєво змінюється траєкторія протікання струму в шлаковій ванні і, як наслідок, кардинально змінюється положення зон тепловиділення, електромеханічних сил, що діють на розплавлені шлак та метал. Тому для дослідження процесу біфілярного ЕШЗ потрібен фізичний експеримент. Нам невідомі публікації про проведення ЕШЗ з біфілярною схемою підключення установки до джерела живлення, крім експерименту на математичній моделі [6, 7].

Метою експериментальних досліджень є порівняння результатів ЕШЗ при біфілярній схемі підключення до джерела живлення та двоелектродній

канонічній схемі підключення. Очікувані результати роботи можуть бути корисними для різних галузей машинобудування, оскільки вони створять реальні умови для підвищення продуктивності ЕШЗ та експлуатаційної працездатності зварних з'єднань з вуглецевих, низько- та середньолегованих сталей великої товщини (40...250 мм).

Матеріали, методи та результати досліджень. Роботи проводились в умовах лабораторії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України*. З метою перевірки працездатності обладнання та технологічних режимів зварювання були виконані експериментальні дослідження біфілярного ЕШЗ із зрівняльним дротом порівняно з канонічною схемою ЕШЗ з двома дротяними електродами. Експерименти виконувалися на установці, оснащій апаратом А-535 з регулятором рівня рідкого металу, датчиком рівня та цифровим вимірювачем швидкості подання електродних дротів, а також живлячим трансформатором ТШС-1000/3 з тиристорним стабілізатором напруги на високій стороні. Схема установки забезпечувала можливість роботи або за канонічною, або за біфілярною схемою живлення з нульовим дротом.

Експерименти проводились з використанням зразків з низьковуглецевої конструкційної сталі завтовшки 70 мм, розміри зразків 420×200×70 мм. В якості зварювального матеріалу використовувався зварювальний дріт діаметром 3 мм і флюс марки АН-8. Кількість електродів у всіх експериментах – 2, відстань між електродами $d = 55$ мм, сухий виліт електрода – 90 мм. Зварювання за каноніч-

*В роботі брав участь О.А. Москаленко.

Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>, Соловійов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>, Тюкалов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-3491-193X>, Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© Ю.М. Ланкін, О.П. Бондаренко, В.Г. Тюкалов, В.Г. Соловійов, І.Ю. Романова, 2022

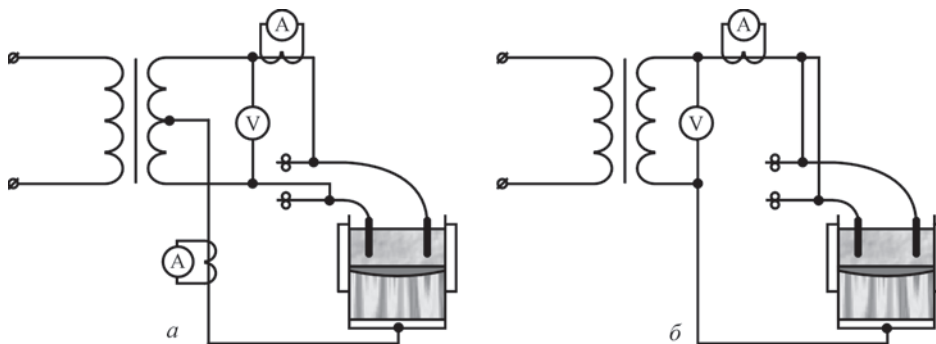


Рис. 1. Експериментальні схеми біфілярного ЕШЗ: зі зрівняльним дротом (а) і канонічним ЕШЗ (б)

ною та біфілярною схемою проводилися практично при однакових потужностях P та швидко-

стях подачі електродів $V_{\text{п}}$, однакових проміжках b і глибинах шлакової ванни $h_{\text{ш}}$. Одне зварювання виконувалося спеціально у вузькому проміжку ($b = 20$ мм) для визначення можливостей біфілярної схеми живлення. Інше ЕШЗ за канонічною схемою виконано на завищеній (у 1,7 разів) потужності зварювання за практично такої ж швидкості

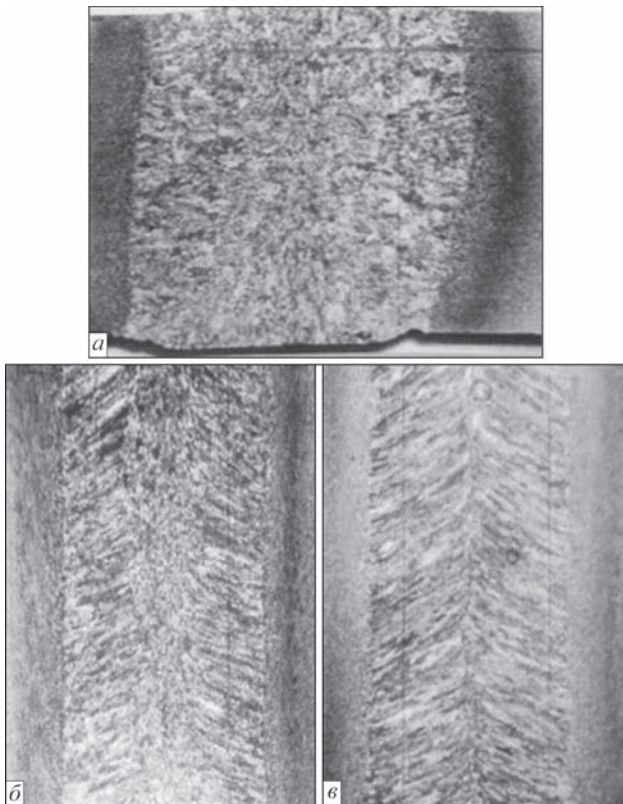


Рис. 2. Макрошліфи зразка № 1: а – поперечний макрошліф зварного з’єднання, виконаного ЕШЗ за біфілярною схемою ($b = 32$ мм); б – поздовжній макрошліф (переріз під електродами); в – поздовжній макрошліф (переріз між електродами)

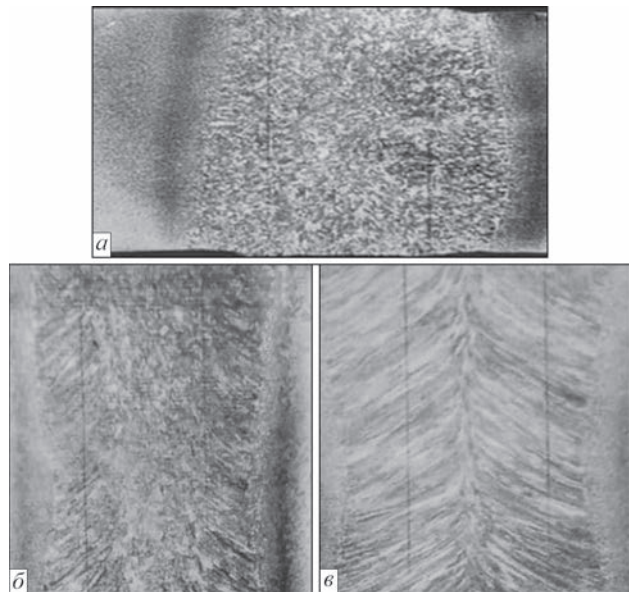


Рис. 3. Макрошліфи зразка № 2: а – поперечний макрошліф зварного з’єднання, виконаного ЕШЗ за канонічною схемою ($b = 32$ мм); б – поздовжній макрошліф (переріз під електродами); в – поздовжній макрошліф (переріз між електродами)

Основні параметри режимів зварювання

Найменування параметра	Номер зразку			
	1	2	3	4
Схема живлення	біфілярна	канонічна	біфілярна	канонічна
Зварювальний проміжок b , мм	32	32	20	32
Відстань між електродами d , мм	55	55	55	55
Напруга зварювання U , В	76	38	76	55
Швидкість подачі дроту $V_{\text{п}}$, м/год	230	240	235	230
Швидкість зварювання $V_{\text{зв}}$, м/год	1,45	1,51	2,37	1,45
Струм електродів I , А	500	960	520	1120
Струм зрівняльний $I_{\text{з}}$, А	0	-	60	-
Глибина шлакової ванни $h_{\text{ш}}$, мм	50	55	40	50
Потужність, що вводиться в шлакову ванну P , кВт	38	36,5	39,5	61,6
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, відн. од.	0,9	0,7	0,89	0,68
Глибина проплавлення кромок, мм	8	13	7	22

подачі електрода. Фіксувалися всі параметри електричних режимів у відповідності до рис. 1.

Основні параметри режимів зварювання наведені в таблиці, а макрошліфи зварних з'єднань – на рис. 2–5.

Обговорення. При зварюванні всіх зразків (№№ 1–4) електрошлаковий процес протікав стійко. Відомо, що процес ЕШЗ одним електродом з живленням від джерела з жорсткою зовнішньою характеристикою стійкий, оскільки має властивість саморегулювання, аналогічно дугового процесу зварювання електродом, що плавиться. У біфілярному ЕШЗ без зрівняльного дроту саморегулювання відсутнє і такий процес нестійкий при дії на нього збурень, неминучих у реальних умовах. Застосування зрівняльного дроту, як показано на рис. 1, а, забезпечило

саморегулювання, отже, і стійкість біфілярного ЕШЗ без систем автоматичного регулювання з негативними зворотними зв'язками.

При використанні біфілярної схеми живлення ЕШЗ із зрівняльним дротом суттєво спрощується та скорочується процес «холодного» старту порівняно з канонічною схемою ЕШЗ двома дрютяними електродами. На цьому етапі кожен електрод живиться практично індивідуально від своєї половини вторинної обмотки трансформатора та розплавлення шлаку здійснюється одночасно двома електричними дугами, що горять між торцями електродів та вхідною кишенею. На цьому етапі весь струм протікає через зрівняльний дріт. Після розплавлення шлаку він стає електропровідним і процес з електродугового перетворюється на електрошлаковий. Поступово дедалі більша частина загального струму починає протікати між електродами, а струм у зрівняльному дроті знижується до нуля. Лише при дуже малих зварювальних зазорах через зрівняльний дріт може постійно протікати струм, зумовлений струмами між електродами та кромками виробу, що зварюється. Величина цього струму невелика. Наприклад, при зварюванні зразка № 3 (зварювальний проміжок 20 мм) вона становила 12 % від загального струму зварювання.

Однією з основних переваг біфілярної схеми живлення ЕШЗ є зниження глибини проплавлення кромки виробу, що зварюється. Як видно з таблиці, глибина проплавлення кромки виробу зварюваного при ЕШЗ за біфілярною схемою (зразок № 1) на 40 % менше глибини проплавлення кромки при ЕШЗ за канонічною схемою (зразок № 2) за інших рівних умов зварювання.

Іншою важливою перевагою біфілярного ЕШЗ є можливість здійснення зварювання у вузький проміжок 20 мм (зразок № 3), що дозволило за тієї ж потужності підвищити швидкість зварювання на 63 % у порівнянні зі зразком № 1.

Відмічено тоншу макроструктуру швів, виконаних за біфілярною схемою живлення. Встановлено наявність двох різних макроструктур у перерізах під електродами та між електродами як при канонічній, так і при біфілярній схемі живлення:

– під електродами дендритна і розорієнтована комірчасто-дендритна макроструктура;

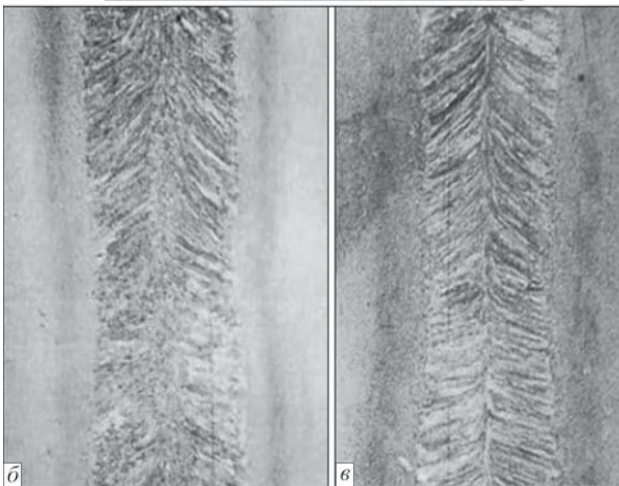
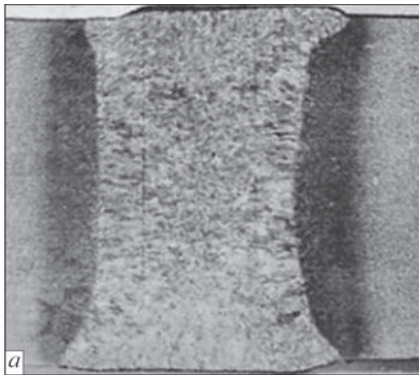


Рис. 4. Макрошліфи зразка № 3: а – поперечний макрошліф зварного з'єднання, виконаного ЕШЗ за біфілярною схемою ($b = 20$ мм); б – поздовжній макрошліф (переріз під електродом); в – поздовжній макрошліф (переріз між електродами)

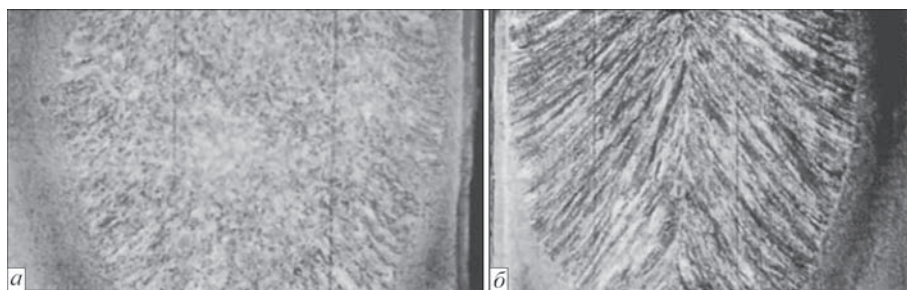


Рис. 5. Поздовжні макрошліфи зварного з'єднання зразка № 4, виконаного ЕШЗ за канонічною схемою, на підвищеній потужності (більше в 1,7 разів): а – переріз під електродом; б – переріз між електродами

– між електродами груба дендритна макро-структура (для усіх зварювань в різні проміжки).

Але у зразку № 4 груба дендритна макроструктура більше виражена в порівнянні із зразком № 2. Передбачається, що при канонічному ЕШЗ з-за прямого проходження струму (електрод–піддон) можливе перегрівання шлаку і, відповідно, поглиблення металеві ванни, що не дозволяє збільшити лінійну швидкість зварювання (можуть утворюватися «гарячі» тріщини в шві, так звана критична швидкість ЕШЗ).

При біфілярній схемі живлення ЕШЗ шляхом відповідного взаємного розташування силових кабелів, що з'єднують джерело живлення зі зварювальним апаратом, з'являється можливість значного зниження індуктивності вторинного контуру джерела живлення. В результаті, наприклад, для нашої зварювальної установки коефіцієнт потужності $\cos \phi$ збільшився з 0,7 для канонічної схеми до 0,9 для біфілярної схеми живлення ЕШЗ. Таке підвищення коефіцієнта потужності значно знижує навантаження на зовнішню електромережу та зменшує витрати на електроенергію.

Висновки

ЕШЗ за біфілярною схемою дозволяє перерозподілити складові теплового балансу в шлаковій ванні. При цьому можливо істотно збільшити швидкість зварювання без негативних наслідків для якості металу зварного шва.

Зрівняльний дріт забезпечує стійкість процесу ЕШЗ з біфілярною схемою живлення.

Глибина проплавлення кромки виробу, що зварюється, при біфілярній схемі ЕШЗ значно менше, ніж при канонічній схемі двоелектродного ЕШЗ.

Стало можливим використовувати проміжки між кромками 20 мм, що значно покращило енергетичні показники процесу ЕШЗ при значному збільшенні лінійної швидкості зварювання.

Відмічено тоншу макроструктуру швів, виконаних за біфілярною схемою живлення.

При переході з канонічної схеми живлення ЕШЗ на біфілярну із зрівняльним дротом різ-

ко збільшився $\cos \phi$ установки (з 0,7 до 0,9), що може забезпечити поліпшення умов роботи зовнішньої мережі живлення установки.

Список літератури

1. Медовар Б.И., Ступак Л.М., Бойко Г.А. (1976) Патон Б.Е. *Электрошлаковые печи*. Киев, Наукова думка.
2. Jing, Xie (2008) Structure advantage of a 5-t double pole series circuit electroslag furnace. *Heavy Casting and Forging*, 5(3), 43–45 (In Chinese).
3. Xi-min, Zang, Tian-yu, Qiu, Xin, Deng et al. (2015) Industrial test of a 6-m long bearing steel ingot by electroslag remelting withdrawing process. *China Foundry*, 12(3), 202–207.
4. Tezuka, M., Yamamoto, S., Takahashi, F. et al. (2014) Internal quality of 2150 mm-diameter ingot manufactured using new 150-ton ESR furnace. *Proceedings of the 19th International Forgemasters Meeting (IFM). Tokyo (Japan), 29.09–03.10*, pp. 90–94.
5. Son, I., Lee, W., Sim, Kw. et al. (2014) Installation of 150-ton new ESR facility and production of 120-ton ESR ingot for 12Cr HIP rotor forgings. *Ibid*, Tokyo (Japan), 29.09–03.10, pp. 333–337.
6. Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю. (2021) Порівняння процесів електрошлакового зварювання при підключенні електричного живлення за двоелектродною моно- та біфілярною схемою. *Автоматичне зварювання*, 11, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.05>
7. Соловйов В.Г., Ланкін Ю.М., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю. (2022) Прогнозування параметрів зварного шва при ЕШЗ з біфілярною схемою підключення джерела живлення. *Там само*, 1, 49–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.01.08>

References

1. Medovar, B.I., Stupak, L.M., Bojko, G.A., (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Jing, Xie (2008) Structure advantage of a 5-t double pole series circuit electroslag furnace. *Heavy Casting and Forging*, 5(3), 43–45 (In Chinese).
3. Xi-min, Zang, Tian-yu, Qiu, Xin, Deng et al. (2015) Industrial test of a 6-m long bearing steel ingot by electroslag remelting with drawing process. *China Foundry*, 12(3), 202–207.
4. Tezuka, M., Yamamoto, S., Takahashi, F. et al. (2014) Internal quality of 2150 mm-diameter ingot manufactured using new 150-ton ESR furnace. In: *Proc. of the 19th Int. Forgemasters Meeting – IFM (Tokyo, Japan, 29.09–03.10)*, 90–94.
5. Son, I., Lee, W., Sim, Kw. et al. (2014) Installation of 150-ton new ESR facility and production of 120-ton ESR ingot for 12Cr HIP rotor forgings. *Ibid.*, 333–337.
6. Lankin, Yu.M., Soloviov, V.G., Tyukalov, V.G., Romanova I.Yu. (2021) Comparison of the processes of electroslag welding at power connection by mono- and bifilar circuits. *The Paton Welding J.*, 11, 22–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.11.04>.
7. Solovyov, V.G., Lankin, Yu.M., Tyukalov, V.G., et al. (2022) Prediction of weld parameters in ESW with a bifilar circuit of power source connection. *Avtomatich. Svarka*, 1, 49–53 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.01.08>.

EXPERIMENTAL STUDIES OF BIFILAR ELECTROSLAG WELDING WITH AN EQUALIZING WIRE

Yu.M. Lankin, O.P. Bondarenko, V.G. Tyukalov, V.G. Solovjov, I.Yu. Romanova

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

At bifilar electroslag welding, compared to the traditional two-electrode circuit, the path of current flowing in the slag pool is significantly different, and, consequently, the position of heat evolution zones and electromechanical forces acting on the molten slag, change drastically. Experiments showed that at bifilar electroslag welding penetration of the edges of welded item metal is considerably smaller, and reduction of the welding gap becomes possible that allows raising the welding speed at the same power, and power factor $\cos \phi$ increases essentially from 0.67 to 0.9. Connection of equalizing wire between the midpoint of the output winding of the power transformer and the item being welded ensures stability of the electroslag welding process by the bifilar circuit of power source connection. 7 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: *electroslag welding, bifilar power circuit, edge penetration, process stability, power factor*

Надійшла до редакції 10.12.2021

ІНДУКТОРИ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТА ТРАМВАЙНИХ ЖОЛОБЧАСТИХ РЕЙОК

Є.О. Пантелеймонов

Мета роботи полягає в створенні індукторів для термічної обробки зварних стиків залізничних та трамвайних жолобчастих рейок. Для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок запропоновані індуктори, що розташовані навпроти один одного з двох сторін рейки. Дослідження локального нагріву залізничних та трамвайних жолобчастих рейок струмами частотою 2,4 кГц показали, що індуктори забезпечують рівномірний нагрів елементів перерізу рейок, низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами металу в голівці рейок та зниження часу нагріву від цехової температури до температури нормалізації. Бібліогр. 8, рис. 3.

Ключові слова: рейки, зварні стики рейок, термічна обробка, індукційний нагрів, індуктори

Вступ. Надійність і експлуатаційні властивості рейкового шляху значною мірою залежать від якості зварних стиків рейок. В умовах високих навантажень та швидкості руху залізничного транспорту зварні стики пошкоджуються частіше, ніж основний метал рейок. Негативний вплив зварювання проявляється в появі по ширині зони термічного впливу місцевого зниження твердості, несприятливої епюри внутрішніх залишкових напружень, зміні однорідності мікроструктури, створенні умов для появи внутрішніх дефектів, що являються концентраторами напружень та послаблюючих відрізки рейок із зварним стиком [1]. Найбільш ефективним шляхом поліпшення якості зварних стиків являється термічна обробка. Вона полягає в локальному нагріві зварних стиків та часток основного металу рейок, що до них примикає, до температури нормалізації 850...950 °С, охолодженні шийки та підосви на спокійному повітрі та загартуванні поверхні катання голівки стислим повітрям. Високу швидкість локального нагріву забезпечує індукційний спосіб нагріву металів струмами високої частоти [2, 3]. Нині, при виконанні термічної обробки зварних стиків залізничних рейок в шляхових та цехових умовах, локальний нагрів рейок виконується струмами частотою 8,0...16,0 кГц. В якості джерела живлення використовуються перетворювачі частоти на IGBT транзисторах. До складу нагрівальних пристроїв входять індуктори без магнітопроводів. Технологія та обладнання забезпечують нагрів зварних стиків залізничних рейок типу Р65 із різних марок до температури нормалізації за час до 240 с. Ширина зони термічного впливу в голівці рейок досягає 80...94 мм, в підосві рейок – 140...150 мм [4, 5].

Доцільність термічної обробки зварних стиків існує як для залізничних рейок, так і рейок інших видів рейкового транспорту – трамвайних, метрополітену, підкранових. Рейки різняться між

Пантелеймонов Є.О. – <https://orcid.org/0000-0002-5569-9141>
© Є.О. Пантелеймонов, 2022

собою формою поперечного перерізу, об'ємом металу окремих елементів та умовами тепловідводу в холодну масу металу. Залізничні рейки мають симетричну форму поперечного перерізу відносно вертикальної осі. Трамвайні жолобчасті рейки, на відміну від залізничних, оснащені жолобом та губою. Поверхня катання, жолоб та губа зміщені відносно вертикальної осі. В залежності від способу зварювання – контактного стикового, індукційного, алюмотермітного, електродугового, зварні стики рейок мають різну ширину зони термічного впливу. Наприклад, ширина зони термічного впливу зварних стиків залізничних рейок типу Р65, виконаних контактним стиковим зварюванням, становить 26...32 мм [6], трамвайних жолобчастих рейок типу РТ62, виконаних автоматичним дуговим зварюванням мундштуком, що плавиться, – 45...55 мм. Для послаблення внутрішніх напружень в металі рейок, що виникають внаслідок неоднорідності об'ємних змін в процесі нагріву, необхідно наприкінці термічної обробки зварних стиків забезпечити однакову температуру елементів перерізу рейок та низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами металу. Враховуючи специфічні особливості дії струмів високої частоти при нагріві виробів складної форми, виникають певні вимоги до конструкції індукторів нагрівальних пристроїв та частоти струму. Індуктори нагрівальних пристроїв повинні створити відповідний розподіл індуктованого струму на поверхні рейок та його щільність, що враховують умови тепловідводу в холодну масу металу та не викликають перегріву виступаючих елементів рейок – пір'я та верхньої кромки губи. Для досягнення низького перепаду температури між поверхневими та глибинними шарами рейок доцільно підвищити глибину проникнення струму в метал, тобто знизити частоту струму.

Мета роботи. Мета даної роботи полягає в створенні індукторів нагрівальних пристроїв для

термічної обробки зварних стиків залізничних та трамвайних жолобчастих рейок, що забезпечують рівномірний нагрів елементів перерізу рейок та низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами металу в голівці рейок.

Опис та особливості конструкції. На рис. 1, а приведена схема нагрівального пристрою для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок. До складу нагрівального пристрою входять індуктори 1 та 2 однакової конструкції [7]. Індуктори розташовані навпроти один одного з двох сторін рейки 3. Форма індуктуючих дротів індукторів повторює форму вигину поверхні рейки над поверхнею катання голівки, бічними поверхнями голівки, шийкою та підшвою. Ширина індуктуючих дротів та повітряні проміжки до поверхні рейок залежать від ширини зони термічного впливу зварних стиків та об'єму елементів перерізу рейок. При малому проміжку індуктований струм концентрується, приблизно, по ширині індуктованого дроту, при великому проміжку – поширюється на значну ширину. Для посилення дії ефекту близькості, внаслідок чого збільшується густина індуктованого струму, індуктори виконані з найменшими повітряними проміжками над голівкою та підшвою рейок і дещо збільшеними проміжками над шийкою рейок. Значне збільшення повітряного проміжку над пір'ям рейки призводить до значного зниження густини індуктованого струму в цих елементах. Індуктуючі дроти індукторів складаються з двох паралельних дротів. Тим самим досягається перерозподіл магнітного поля по ширині індуктуючого дроту та наближення густини індуктованого струму до зовнішніх країв індуктуючого дроту. Загальна ширина дротів в індукторах для термічної обробки зварних стиків рейок типу Р65 дорівнює 60 мм. Це більше ши-

рини зони термічного впливу та частки основного металу рейок, що до неї примикає, після контактного стикового та автоматичного дугового зварювання мундштуком, що плавиться. Для концентрації нагріву на бокових поверхнях елементів перерізу рейок та загального підвищення коефіцієнту корисної дії системи індуктор – рейка використані магнітопроводи 4, що встановлені над поверхнею катання голівки, бічними поверхнями голівки, шийкою та частиною підшви рейки. Магнітопроводи складаються з набору пластин трансформаторної сталі.

Індуктори 1 та 2 нагрівальних пристроїв для термічної обробки зварних стиків трамвайних жолобчастих рейок [8] мають різну конструкцію (рис. 1, б). Індуктуючий дріт індуктора 1, що встановлений зі сторони голівки рейки 3, подовжено тільки до початку жолоба 5. Це запобігає перегріву губи, оскільки магнітний потік в западину жолоба послаблюється великим повітряним проміжком. Форма індуктуючого дроту повторює форму вигину поверхні рейки над поверхнею катання голівки, бічною поверхнею голівки, шийкою та частиною підшви. Повітряні проміжки збільшені над шийкою та значно збільшені над пір'ям рейки. Магнітопроводи 4 встановлені над поверхнею катання голівки, бічною поверхнею голівки, шийкою та частиною підшви. Індуктуючий дріт індуктора 2, що встановлений зі сторони губи 6, повторює форму вигину поверхні рейки над бічною поверхнею губи, шийкою та частиною підшви. Індуктуючий дріт подовжено тільки до верхньої кромки губи. Повітряні проміжки збільшені над бічною поверхнею губи, шийкою та значно збільшені над пір'ям рейки. Магнітопроводи 4 встановлені над бічною поверхнею губи, шийкою та частиною підшви рейки. Метал губи

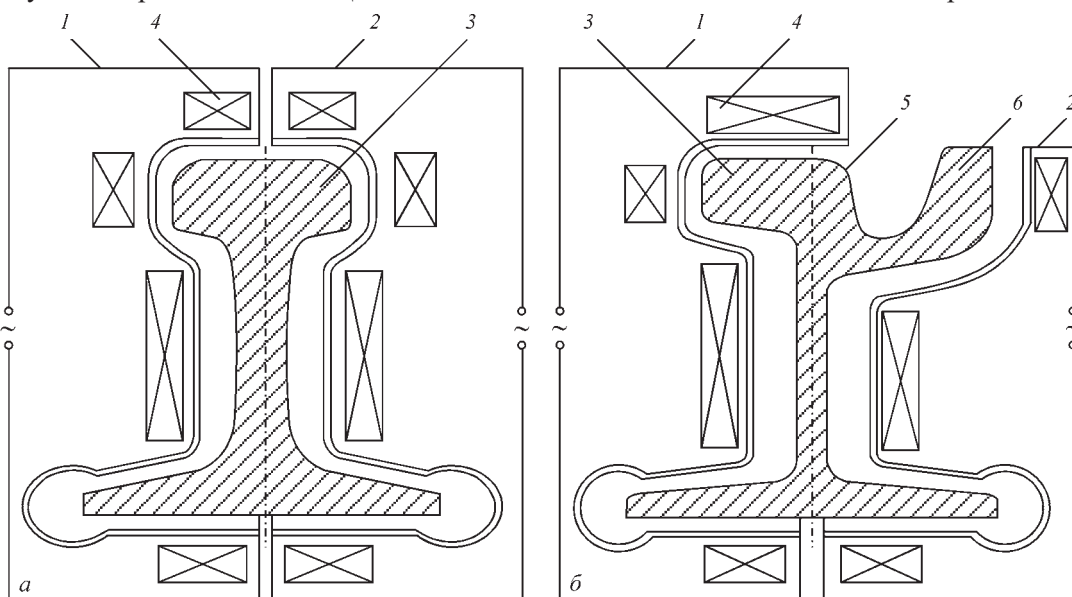


Рис. 1. Схема нагрівальних пристроїв для термічної обробки зварних стиків залізничних (а) та трамвайних жолобчастих (б) рейок (опис. 1–6 див. у тексті)

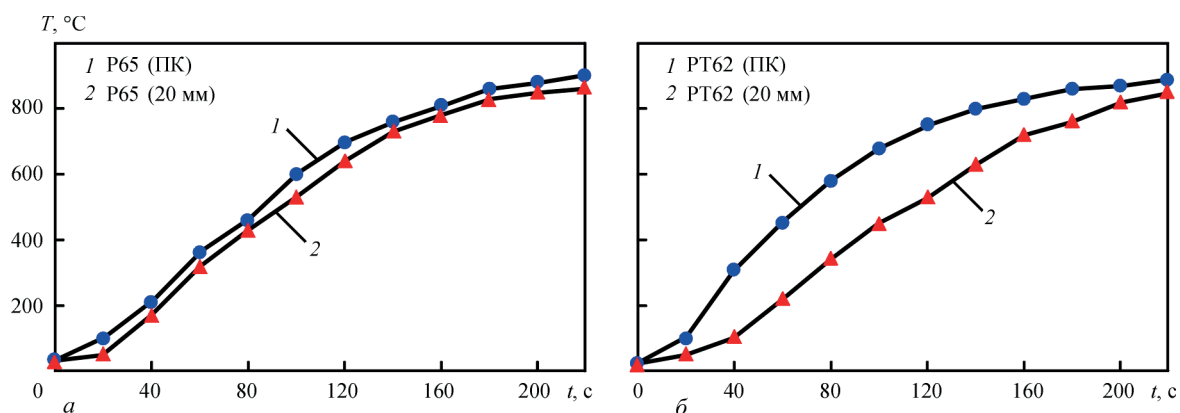


Рис. 2. Часові залежності температури на поверхні катання голівки (ПК) та на глибині 20...22 мм (20 мм) від поверхні катання залізничних рейок типу P65 (а) та трамвайних жолобчастих рейок типу PT62 (б)

грється частково внаслідок теплопровідності від нагрітого металу голівки, частково від індуктованого струму на бічній поверхні губи. В обох індукторах індуктуючі дрти також складаються з двох паралельних дртів. Загальна ширина дртів перевищує ширину зони термічного впливу стиків після контактного стикового або дугового зварювання.

Результати дослідження та їх обговорення.

Ефективність індукторів досліджували при локальному нагріві залізничних рейок типу P65 та трамвайних жолобчастих рейок типу PT62 струмами частотою 2,4 кГц. Температуру нагріву вимірювали на поверхні катання голівки, на глибині 20...22 мм від поверхні катання, по центру шийки, на відстані 10 мм від країв пір'я, в місцях переходу голівки в шийку та шийки в підшову, на глибині 10 мм від верхньої кромки губи та в центрі губи. Для виміру температури застосовували хромель-алюмелеві термопари. Початкова температура основного металу рейок становила 20 °С. В якості джерела живлення використовували тиристорний перетворювач частоти типу ТПЧТ-160/2,4. В процесі нагріву рейок до температури нормалізації підтримували постійну величину струму випрямляча ТПЧТ. Тим самим компенсували реакцію перетворювача частоти на зміну комплексного опору навантаження внаслідок зміни питомого електричного опору та магнітної проникності металу рейок. На рис. 2 приведені часові залежності температури нагріву голівки залізничних та трамвайних жолобчастих рейок. Встановлено, що при нагріві залізничних рейок протягом 220 с, температура на поверхні катання голівки досягла 900 °С. Потужність на виході випрямляча ТПЧТ змінювалася від 90 до 105 кВт. Тривалість етапу нагріву до температури магнітних перетворень, так званий холодний режим, становила близько 60 % від часу нагріву, середня швидкість нагріву на цьому етапі – 5,6 °С/с. Тривалість етапу нагріву вище температури магнітних перетворень, так званий гарячий

режим, дорівнювала 40 %. Швидкість нагріву на цьому етапі зменшилася до 1,7 °С/с. При нагріві трамвайних жолобчастих рейок впродовж 220 с температура на поверхні катання голівки досягла 890 °С. Потужність на виході випрямляча ТПЧТ змінювалася від 90 до 100 кВт. Тривалість етапу «холодного режиму» була більше, ніж при нагріві залізничних рейок. Вона становила близько 75 %. Середня швидкість нагріву дорівнювала 4,5 °С/с. Тривалість етапу «гарячого режиму» зменшилася до 25 %, швидкість нагріву на цьому етапі збільшилася до 2,6 °С/с. На рис. 3 приведені значення температури в елементах перерізу рейок по закінченню процесу локального нагріву. В залізничних рейках температура шийки дорівнювала температурі поверхні катання голівки. Перепад температури між поверхнею катання голівки та шару на глибині 20 мм був не більше 40 °С, між центром голівки та місцями переходу голівки в шийку та шийки в підшову не перевищив 20...40 °С. Температура пір'я рейок була на рівні 830...840 °С. Ширина зони термічного впливу на поверхні катання голівки, в центрі шийки та низу підшови, становила 54 мм. В місцях переходу голівки в шийку та

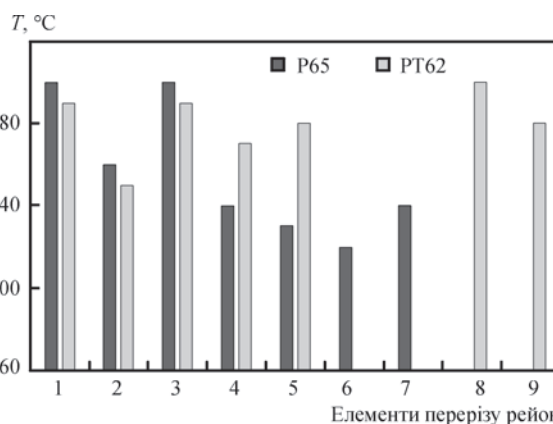


Рис. 3. Температура нагріву елементів перерізу залізничних рейок типу P65 та трамвайних жолобчастих рейок типу PT62: поверхня катання голівки (1); на глибині 20...22 мм від поверхні катання голівки (2); шийка (3); пір'я (4, 5); місце переходу голівки в шийку (6); місце переходу шийки в підшову (7); верхня кромка губи (8); центр губи (9)

шийки в підшву ширина зони термічного впливу була нижче на 4...6 мм. Це викликано послабленням дії ефекту близькості внаслідок труднощів розміщення магнітопроводів в таких місцях. В трамвайних жолобчастих рейках перепад температури між поверхнею катання голівки та шару на глибині 22 мм був не більше 40 °С. Температура шийки дорівнювала температурі на поверхні катання голівки, температура пір'я рейки була на 10...20 °С менше. Температура нагріву верхньої кромки та центра губи майже не відрізнялася від температури інших елементів перерізу рейки.

Висновки

Розроблені індуктори нагрівальних пристроїв для термічної обробки струмами високої частоти зварних стиків залізничних та трамвайних жолобчастих рейок, виконаних способами контактного стикового або дугового зварювання. Конструкції індукторів враховують форму поверхні рейок та об'єм елементів перерізу.

Перевірка ефективності індукторів при локальному нагріві залізничних рейок типу Р65 та трамвайних жолобчастих рейок типу РТ62 струмами частотою 2,4 кГц показала, що індуктори забезпечують зниження часу нагріву елементів перерізу рейок від цехової температури до температури нормалізації, рівномірний нагрів елементів перерізу рейок, низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами металу в голівці рейок та зменшення ширини зони термічного впливу після термічної обробки в порівнянні з існуючим обладнанням.

Список літератури

1. Шур Е.А., Федін В.М., Борц А.И. и др. (2019) Пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков. *Вестник ВНИИЖТ*, 78, 4, 210–217.
2. Головин Г.Ф., Зимин Н.В. (1979) *Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева*. Вып. 3. Ленинград, Машиностроение.

3. Фещуков А.Н. *Устройство термической обработки сварных стыков рельсов в полевых условиях*. Россия, Пат. RU168673, МПК E01B31/18
4. Резанов В.А., Федін В.М., Башлыков А.В. (2013) Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов. *Вестник ВНИИЖТ*, 2, 28–33.
5. СТО РЖД 1.08.002-2009 (2009) *Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом*. Москва, ОАО «РЖД».
6. Кучук-Яценко С.І., Антіпін Є.В., Дідковський О.В. та ін. (2020) Оцінка якості зварних з'єднань високоміцних залізничних рейок сучасного виробництва з урахуванням вимог Українського та Європейського стандартів. *Автоматичне зварювання*, 7, 3–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.07.01>
7. Pantelejmonov, E.A., Gubatyuk, R.S. (2016) Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, 10, 41–43. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.10.08>
8. Пантелеймонов Є.О., Дацюк І.І. (2006) *Індукційний пристрій для термічної обробки зварних стиків трамвайних рейок*. Україна, Пат. 149152, МПК C21D 1/10 (2006.01)

References

1. Shur, E.A., Borts, A.I. et al. (2019) Means of elimination of higher damage of rails in the welded joint zone. *Vestnik VNIIZhT*, 78(4), 210–217 [in Russian].
2. Golovin, G.F., Zimin, N.V. (1979) *Technology of heat treatment of metals using induction heating*. Issue 3. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
3. Feshchukov, A.N. *Device for heat treatment of rail welded joints in field conditions*. Russia, Pat. RU168673, Int. Cl. E01B31/18 [in Russian].
4. Rezanov, V.A., Fedin, V.M., Bashlykov, A.V. (2013) Differential hardening of rail joints. *Vestnik VNIIZhT*, 2, 28–33 [in Russian].
5. SТО RZhL 1.08.002-2009 (2009) *Railway rails welded by resistance welding*. Moscow, JSC RZhD [in Russian].
6. Kuchuk-Yatsenko S.I., Antipin E.V., Didkovskiy O.V., et al. Evaluation of quality of welded joints of high-strength railway rails of modern production taking into account the requirements of Ukrainian and European standards. *The Paton Welding J.*, 7, 2–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.07.01>.
7. Pantelejmonov, E.A., Gubatyuk, R.S. (2016) Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, 10, 41–43. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.10.08>.
8. Pantelejmonov, E.O., Datsuk, I.I. (2006) *Induction device for heat treatment of welded joints of tram rails*. Ukraine, Pat. 149152, Int. Cl. C21D 1/10 (2006.01) [in Ukrainian].

INDUCTORS FOR HEAT TREATMENT OF WELDED BUTT JOINTS OF RAILWAY AND TRAM GROOVED RAILS

E.O. Panteleimonov

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The aim of the work is to create inductors for heat treatment of welded butt joints of railway and tram grooved rails. For thermal treatment of welded butt joints of railway rails, the inductors were proposed, located opposite each other on the two sides of a rail. Investigation of local heating of railway and tram grooved rails with a frequency of 2.4 kHz showed that inductors provide a uniform heating of cross-section elements of the rails, a low difference in temperature between the surface and deep layers of the metal in the head of the rails and a decrease in heating time from the workshop temperature to the normalization temperature. 8 Ref., 3 Fig.

Keywords: rails, welded butt joints of rails, heat treatment, induction heating, inductors

Надійшла до редакції 20.12.2021

ЕКОНОМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ЗВАРЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПАЛИВНИХ БАКІВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Л.М. Лобанов¹, О.П. Кушнар'єв², О.А. Мазур¹, Т.М. Лабур¹, І.Л. Снегірьов², С.В. Пустовойт¹

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

²ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля». 349008, м. Дніпро, вул. Криворізька, 3. E-mail: info@yuzhnoye.com

При виготовленні космічних апаратів застосовується зварювання та інші споріднені технології. При створенні конструкцій ракет третього покоління особливу увагу приділяють проблемам підвищення показників надійності та безпеки польотів, що забезпечується шляхом раціонального використання в конструкції нових видів високоресурсних зварних з'єднань, які отримують шляхом впровадження ефективних способів зварювання. Здійснено аналіз виробництва традиційної (вафельної) конструкції та перспективної (стрингерної), з урахуванням економічної доцільності застосування способів зварювання. З точки зору економічної доцільності перспективно використання зварювання тертям з перемішуванням. При цьому можна очікувати значну економічну ефективність застосування технології зварювання тертям для виготовлення конструкцій паливних баків ракет-носіїв. Бібліогр. 10, табл. 7, рис. 11.

Ключові слова: алюмінієві сплави, дугове зварювання, лазерне зварювання, гібридне лазерно-дугове зварювання, зварювання тертям з перемішуванням, економічні витрати, дослідження

Вступ. В даний час при виготовленні космічних апаратів широко застосовується зварювання та інші споріднені технології. Космічна промисловість пред'являє до них все більш високі вимоги, що пояснюється використанням нових конструкційних матеріалів, безперервним зростанням вимог до якості з'єднань, ускладненням умов їх експлуатації [1].

Вдосконалення конструктивних елементів об'єктів ракетно-космічної техніки висуває жорсткі вимоги і до технологічного процесу їх виробництва. Особливо при підготовці виробництва до випуску нових виробів ракетно-космічної техніки висуваються вимоги максимального скорочення термінів і зниження вартості підготовки виробництва [2]. Основним завданням при цьому є розробка і впровадження більш прогресивних технологій зварювання [3–5], а також проектування і виготовлення технологічного оснащення, тому що ефективність застосування зварювання при виготовленні об'єктів ракетно-космічної техніки багато в чому визначається технологічним устаткуванням і пристосуванням, які використовуються при здійсненні складально-зварювальних операцій. Це спонукає постійно вдосконалювати існуюче, створювати і конструювати унікальне зварювальне обладнання.

Проблематика. Сучасні об'єкти ракетно-космічної техніки експлуатуються переважно в умовах інтенсивних та екстремальних навантажень, тому до переліку основних вимог, які висуваються до таких конструкцій, включають повний спектр аеродинамічних збурень, вплив наднизьких температур і агресивність навколишнього середови-

ща, ризики в умовах польоту та вартість виробництва (табл. 1). При польоті ракети-носія для створення у повітряному середовищі підйомної та керуючої сил використовують несучі поверхні конструкції. Крім того, працює силова установка, яка підтримує висоту та тривалість польоту ракети за допомогою енергії палива, що знаходиться у відповідному баковому секторі.

Метою роботи було здійснити аналіз ефективності виробництва вафельної та стрингерної конструкції з урахуванням економічної доцільності застосування нових конструкційних матеріалів та різних способів зварювання: дугового, лазерного, гібридного лазерно-дугового, а також тертям з перемішуванням.

Матеріали й методи. Застосовано методи визначення економічної оцінки технологічного процесу, методи наукового спостереження, порівняння їх основних показників. При цьому використовували аналітичний метод та метод економіко-статистичного аналізу.

Результати та обговорення. Виробництво космічних літальних апаратів, перш за все, пов'язано з потребою в матеріалах [6], які мають високі механічні і ресурсні властивості в умовах наднизьких температур. До таких конструкцій відносяться герметичні резервуари для зберігання рідких компонентів палива. Конструкція баку, який наповнюється кріогенним паливом, займає значну частину габаритів літального апарату. Його конструкція повинна відповідати наступним експлуатаційним вимогам:

– стійкість до зовнішнього нагрівання;

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>

© Л.М. Лобанов, О.П. Кушнар'єв, О.А. Мазур, Т.М. Лабур, І.Л. Снегірьов, С.В. Пустовойт, 2022

Таблиця 1. Основні вимоги до конструкцій ракетно-космічної техніки

Вимоги	Характеристики матеріалу
Навантаження	Міцність
Вібрація	Втома, фреттинг, стирання
Температура	Повзучість, подовжена міцність, окислення, корозія, теплове розширення, теплопровідність
Навколишнє середовище	Загальна корозія, корозія під напругою, тиск пару
Маса	Щільність
Жорсткість	Модуль пружності, пластичність
Безпечність	Подовження, в'язкість, однорідність властивостей, надійність
Економічність	Вартість матеріалів, виробництва, технічне обслуговування, строки експлуатації

– достатню для збереження в холоді криогенного ракетного палива теплоізоляцію внутрішньої поверхні баку;

– здатність попереджати можливість втрат рідкого палива.

Відсік стартового прискорювача складається з двох типів баків різної довжини, а також проміжного циліндру. Його з'єднують з трьох типових елементів у вигляді панелей, які, зазвичай, виготовляються з алюмінієвих сплавів різної товщини. Панелі мають вафельну ромбовидну внутрішню поверхню. Суттєво покращити вагові та льотно-тактичні характеристики літального апарату дозволяє правильний вибір конструкції паливних баків. Особливу увагу приділяють задоволенню вимогам забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції за умов мінімальної маси, забезпечення масової ефективності матеріалу, яка визначається співвідношенням питомої міцності $\sigma_{\text{доп}}/\rho$ до вартості 1 кг матеріалу.

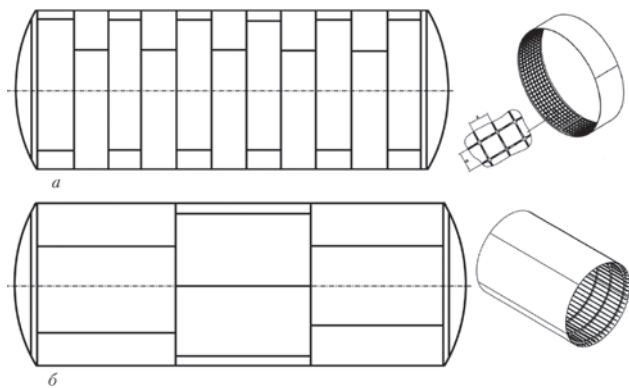


Рис. 1. Основні конструкції паливних баків: вафельна (а) та стрингерна (б)

Конструкції баку відносяться до штампозварних, товщина оболонки яких складає 3...5 мм. В процесі виготовлення такої конструкції одним з головних є вимога до рівня зварювальних напружень та деформацій. З цією метою зварювання виконують переважно в нижньому положенні. Для цього використовують спеціальне оснащення, яке передбачає вільну усадку швів в процесі зварювання, що визначається показником жорсткості зварного вузла та оснастки.

Для рішення цих задач відпрацьовуються різні концепції. Наприклад, для створення конструкцій баків передбачається можливість подальшого підвищення якості, надійності та строку експлуатації виробу шляхом застосування нових високоміцних легких сплавів, ефективних способів зварювання, сучасної методології проектування та якісне виготовлення зварних вузлів в умовах виробництва. Реалізація концепції базується на виготовленні зварних вафельних або стрингерних панелей баків, які повинні мати значну жорсткість і мінімальну питому масу при високому рівні конструкційної міцності. Вона передбачає суттєву економію металу, зниження маси конструкції баку.

Базовими аспектами таких розробок стали: покращення аеродинамічних властивостей, застосування нових конструктивних елементів, удосконалення технології виробництва, заміна матеріалів. Це забезпечило покращення тактико-технічних параметрів виробів: підвищення вантажопід'ємності, зниження питомого використання палива, збільшення дальності польоту та часу перебування конструкції у космічних умовах, що дозволило розширити спеціалізацію ба-



Рис. 2. Види ракетно-космічної техніки, створеної в ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля»

зових моделей зазначеної техніки шляхом створення нових модифікацій.

Поява сучасних моделей ракет-носіїв дозволила освоїти нові тактико-технічні характеристики, які забезпечують космічному транспорту необхідну високу експлуатаційну ефективність та економічність. Загальна тенденція розвитку конструкцій таких апаратів в основному пов'язана з освоєнням високих швидкостей та тривалості польоту, а також забезпеченням відповідних робочих температур конструкції (рис. 2).

Істотне значення у підвищенні масової ефективності зварної конструкції залежить від досконалості напівфабрикатів і якості виконання зварювання, що часто визначається не тільки удосконаленням окремих конструктивних елементів, але й опрацюванням технологічних можливостей матеріалу, який використовується. Проектувальники конструкцій пред'являють до них, крім зварюваності, вимоги забезпечення високої питомої міцності та пластичності зварних з'єднань при наявності достатнього рівня показника в'язкості руйнування. Саме це забезпечує умови довгострокового періоду виконання завдань космічного польоту навіть при наявності пошкоджень. З огляду на зростаючу швидкість літальних апаратів і підвищення при цьому робочої температури зовнішніх панелей, алюмінієві сплави та їх зварні з'єднання повинні виявляти також високу термостійкість та стійкість до термоциклування в умовах експлуатації.

Наприклад, при виготовленні конструкції баку з алюмінієвих сплавів типу АМг6, 2219 (1201) ракети класу «Зеніт» широко застосовується технологія дугового зварювання вольфрамовим електродом в середовищі захисного газу. При використанні даного способу зварювання були виготовлені для різних моделей ракет-носіїв зварні конструкції паливних баків, підвесних відсіків для пального та окислювача ракет різного класу. Надійність з'єднань при цьому забезпечується завдяки використанню процесів зварювання трьохфазною дугою або неплавким електродом пульсуючою дугою. Використовують, крім того, для електронно-променевого зварювання джерела високої концентрації тепла. Всі зазначені способи зварювання поліпшують структуру з'єднань, збільшують міцність на 70...100 МПа та K_C – на 20...25 %. При цьому слід відмітити, що поліпшення властивостей досягається не тільки в металі шва, але й у найбільш слабкій зоні зварних з'єднань – на границі його сплавлення з основним металом.

Однією з важливих передумов зменшення маси космічних апаратів залишається необхідність використання досконалої технології виробництва. Хоча у виробництві літальних апаратів вони від-

різняються малою продуктивністю, високою вартістю обладнання, тим не менш, забезпечують високу надійність з'єднань та здатність конструкції протистояти жорстким умовам експлуатації. До числа таких способів з'єднання типових елементів паливного баку відносяться дугове зварювання алюмінієвих сплавів неплавким та плавким електродами в середовищі захисного газу. Воно не знайшло широкого застосування в світовій аерокосмічній промисловості, оскільки не забезпечує достатньо високих механічних властивостей з'єднання та необхідного рівня надійності. Тим не менш, даний спосіб з'єднання залишається в Україні одним з головних.

В теперішній час при створенні конструкцій ракет третього покоління особливу увагу приділяють проблемам підвищення показників надійності та безпеки польотів, а вони, як відомо, забезпечуються шляхом раціонального використання в конструкції нових видів високоресурсних зварних з'єднань, які отримують шляхом впровадження ефективних способів зварювання. Чим більш відповідальні функціональні задачі постають перед новими космічними апаратами, тем більше досконалішими повинні бути матеріали та технології їх обробки (термічної, механічної та пластичної), а також процеси зварювання. Розробка та виробництво таких конструкцій потребують інтенсивного розвитку зазначених технологій з урахуванням економічної доцільності. Це, відповідно, висуває ще більш складні технічні задачі перед науковцями та виробниками таких високотехнологічних апаратів.

Зараз в сучасному виробництві ракет-носіїв використовують паливні баки вафельного або стрингерного типу (див. рис. 1). У вафельній конструкції панелі обичайки складаються з плит, наприклад, з алюмінієво-магнієвого сплаву марки АМг6, який характеризується підвищеною міцністю при низькій питомій масі. Такий тип баків виготовляється за допомогою попередньої механічної обробки плити шляхом фрезування для отримання відповідно поздовжніх і поперечних ребер жорсткості. Одночасно при цьому плиту також готують до процесу зварювання. При фрезеруванні плити вимушено відбуваються значні втрати матеріалу у вигляді стружки, загальний об'єм якої досягає майже 60 %. Але є технологічна можливість її повторної переробки (рециклування) металевих залишків.

З точки зору виконання швів при зварюванні така конструкція паливного баку і технологія його промислового виробництва знайшла широке застосування з огляду на спрощене здійснення. При складанні та зварюванні конструкції паливного баку вафельного типу зварні шви є стиковими, виконання яких відбувається впродовж по лінії контакту. Крім того, мають місце також кільцеві

шви при з'єднанні обичайок в циліндричну конструкцію баку. Такі шви переважно виконують за допомогою аргонодугового зварювання. Така технологія зварювання сплаву АМг6 розроблена та з успіхом використовується на різних підприємствах машинобудування, включаючи й завод «Південмаш». На рис. 3 представлені значення витрат на виконання процесу зварювання вафельних і стрингерних паливних баків.

Слід зауважити, що сплав АМг6 випускається тільки в РФ. На світовому ринку алюмінієвих сплавів присутній сплав марки АМг5, але він має менший рівень міцності. Тому виробництво з нього конструкційних елементів паливних баків потребує збільшення товщини напівфабрикату, що викликає зростання маси ракети-носія. Як результат відбувається підвищення витрат при виході на орбіту еквівалентного корисного вантажу.

Конструкція паливного баку стрингерного виду більш досконала, але потребує використання алюмінієво-мідних марок сплавів (типу 2219 або 1201), а також алюмінієво-літєвих марок сплавів (типу 2195, 2198 або В1469). Ці сплави були розроблені для криогенного призначення, тобто для роботи за умов наднизьких температур космосу. Характерною ознакою зазначених сплавів є здатність металу до низькотемпературного зміцнення при збереженні високого рівня показників пластичності та в'язкості.

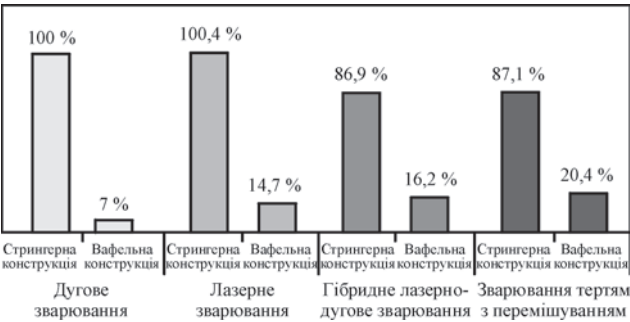


Рис. 3. Витрати на зварювання вафельних та стрингерних топливних баків (за 100 % прийнято витрати на дугове зварювання стрингерної конструкції)

точності та в'язкості.

Кожна з розглянутих видів конструкцій паливних баків має свої технічні та технологічні недоліки та переваги (табл. 2).

Розвиток космічних послуг, висока вартість напівфабрикатів, а також залежність від імпортованих поставок сплаву АМг6, 1201 та В1469 з РФ сприяли техніко-економічному аналізу доцільності застосування стрингерних конструкцій паливних баків і технології їх виготовлення, в яких втрати на придбання дорожчого матеріалу знижені до мінімального рівня. Це дозволяє знизити праце- та енерговитрати зварювальних робіт, покращити тактико-технічні характеристики ракети та підвищити масу корисного вантажу, що виводиться на орбіту.

В теперішній час в ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» розроблено удосконалені конструкції перспективних моделей паливних баків сучасних ракет-носіїв, в яких використовуються принципово нові конструкторські рішення – елементи конструкції виконано з застосуванням стрингерів і шпангоутів з гнуто-зварних профілів. При виготовленні таких елементів повністю виключається операція фрезерування, а самі процеси здійснюються шляхом використання високотехнологічних способів зварювання. Об'єми зварювальних робіт при цьому в 10 разів підвищуються порівняно з аналогічним показником для конструкцій баку вафельного типу. Перехід на освоєння стрингерної конструкції паливного баку та технологічний регламент його виготовлення зумовлює проведення економічного аналізу різних способів зварювання, які при цьому доцільно використовувати, з метою оптимального вибору. При проведенні економічної оцінки технічних можливостей сучасних способів зварювання розглядалися умови реалізації як вафельної, так і стрингерної конструкцій паливного баку. Зазвичай при їх виготовленні використовуються відомі дугові способи зварювання плавким і неплавким електродами в інертному

Таблиця 2. Недоліки та переваги у вафельних та стрингерних конструкціях паливних баків

Вид конструкції	Переваги	Недоліки
Вафельна	– Менша трудомісткість складально-зварювальних робіт; – мала протяжність зварних швів; – шви – стикові (кільцеві та виконані вздовж орієнтації прокату напівфабрикатів); – менша потреба у спеціальному допоміжному зварювальному обладнанні; – незначний об'єм робіт щодо контролю якості зварних швів.	– Великий об'єм робіт щодо механічної обробки (фрезерування) металу; – значний процент відходів дорогоцінного матеріалу.
Стрингерна	– Менший об'єм робіт щодо механічної обробки (фрезерування) металу; – можливість використання гнутих профілів для виготовлення стрингерів і шпангоутів; – використання при виготовленні панелей обичайок тонколистових конструкційних матеріалів.	– Висока трудомісткість складально-зварювальних робіт; – значна протяжність зварних швів; – необхідність використання спеціальних стендів для складання та зварювання конструкцій; – великий об'єм робіт для контролю зварних швів.

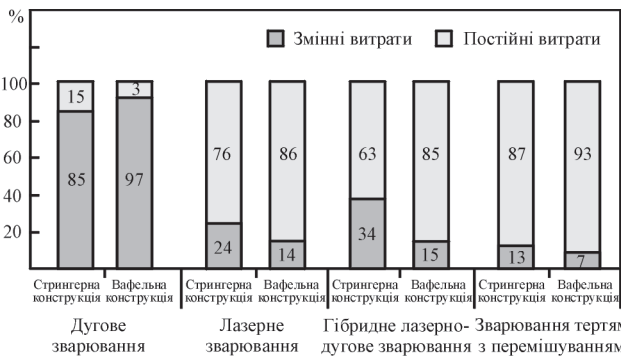


Рис. 4. Співвідношення перемінних і постійних витрат на виконання зварювання вафельних і стрингерних паливних баків середовищі аргону або гелію [3]. В останні роки розроблено технології лазерного та гібридного (лазерно-дугового) зварювання [7–9], а також зварювання у твердій фазі – тертям з перемішуванням [10]. Кожен з цих зазначених способів зварювання має свої технологічні переваги та недоліки, тому в якості методу їх ранжування була прийнята величина технологічних витрат на здійснення відповідного процесу зварювання.

Для цього був проведений технологічний аналіз здійснення цих способів, визначені економічні витрати на реалізацію процесу зварювання в ході виконання річної програми випуску відповідної техніки, більш аргументована величина можливої мінімальної рентабельності в загальному об’ємі виробництва та з урахуванням обраної кількості основного і допоміжного зварювального обладнання, необхідного технологічного оснащення та відповідних пристосувань (рис. 4).

Як показали результати аналізу, при виготовленні паливних баків стрингерної конструкції дуговим зварюванням з використанням присадних дрітів з’являється значна протяжність (довжина) таврових і кутових швів, тобто в конструкцію додається значна маса металу, що наплавляється (табл. 3).

В такому разі у виробі можуть виникнути напруження та деформації. Для їх зниження в з’єднанні доцільно застосувати спеціальні стенди для створення умов бездеформаційного зварювання [4]. Слід також відзначити, що особливістю процесу виготовлення тонкостінних паливних баків стрингерної конструкції являється високий рівень термодеомаційного впливу зварних швів, які послідовно накладаються при з’єднанні окремих елементів. Тому виникає необхідність використання спеціальних методів щодо зниження такого

Таблиця 3. Об’єми наплавленого металу при виготовленні одного комплексу паливних баків

Технологія зварювання	Маса наплавленого металу, кг
Дугова	325
Лазерна	113
Гібридна	150
ЗТП	35

впливу аж до повного їх попередження. Це можливо отримати шляхом використання попереднього навантаження зварних панелей за допомогою спеціально розроблених в ІЕЗ стендів, які пройшли випробування в суднобудівельній галузі та при створенні зразків окремих типових елементів ракетно-космічної техніки.

При виготовленні типових елементів космічного корабля широке застосування отримала технологія контактно-стикового зварювання. Метод було розроблено для зварювання шпангоутів значної товщини, які мають складну форму в поперечному перетині, а також при використанні підвісних конструкцій паливних відсіків. Найбільш ефективним виявився термічний цикл з використанням режиму неперервного оплавлення (рис. 5). Це забезпечує умови концентрованого нагрівання основного металу, що дозволяє скоротити кутову деформацію зварного з’єднання.

Для з’єднання елементів стрингерної конструкції баків можуть бути також використані технології лазерного або гібридного (лазерного + дугового) зварювання, що забезпечує зменшення розмірів зони термічного впливу та значне зниження деформацій зварного вузла [5]. Головна задача зазначених процесів зварювання полягає в максимальному наближенні фізико-механічних властивостей з’єднань з основним металом. Основними вимогами до технологій є отримання високої якості з’єднання матеріалів при зварюванні, а також забезпечення мінімального ризику руйнування конструкції при експлуатації виробів поряд з допустимою вартістю виробництва. Процес лазерного

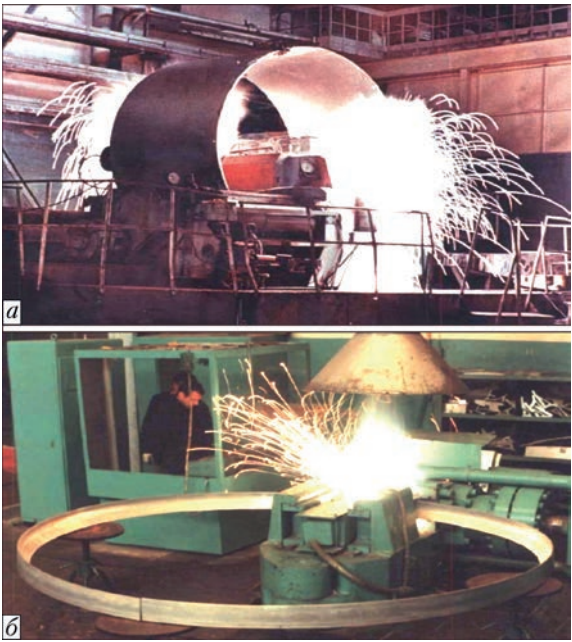


Рис. 5. Приклади використання контактно-стикового зварювання у виробництві фрагментів конструкцій аерокосмічної техніки з високоміцного сплаву АМгб: а – зварювання обичайки корпусу паливного баку; б – зварювання шпангоутів

зварювання відбувається без присадного металу. Кромки прямі, а зазор між ними максимальний (0,1...0,2 мм), тобто вимоги до підготовки металу до зварювання високі, а здатність заповнення зазору низька. Особливо це важливо при зварюванні конструкцій великої протяжності. Проблема була вирішена шляхом комбінації лазерного процесу та дугового з додаванням присадкового металу, що дозволило в 5...10 разів збільшити розміри зазорів між кромками, що зварюються.

Лазерне та гібридне зварювання відноситься до висококонцентрованих процесів з'єднання, тому при зварюванні додається менше погонної енергії у виріб. В результаті величини напруження і деформація, які відбуваються в зварних швах, менші. Це дозволяє при здійсненні процесів лазерного та гібридного зварювання відмовитися від застосування стендів для бездеформаційного зварювання. Крім того, при застосуванні цих способів зварювання маса наплавленого металу в 2...3 рази менша, ніж за умови дугового зварювання.

Розглянемо статті витрат на реалізацію процесу зварювання елементів паливних баків (табл. 4), коли необхідно виконати річну програму виготовлення такої конструкції. В загальному виді сумарні витрати складаються з постійних (на амортизацію та поточний ремонт) і перемінних витрат (на зварювальні матеріали, зарплату робітникам, електричну енергію для зварювання та вентиляцію повітря робочої ділянки зварювальника).

Вартість основного та допоміжного зварювального обладнання визначає величину постійних затрат на амортизацію та поточний ремонт, а також впливає на сумарні витрати для реалізації процесу зварювання при виконанні річної програми (рис. 6).

Доля постійних витрат для виконання лазерно-

го зварювання та зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) в структурі загальних технологічних витрат на здійснення річної програми складає майже 76 і 87 % відповідно, а для гібридного зварювання – 63 %.

Наступною значною статтею витрат на виготовлення конструкції баку є витрати на придбання необхідної кількості зварювальних матеріалів. Їх використовують для отримання якісних зварних швів шляхом формування технологічного посилення. При дуговому способі доля витрат на такі матеріали в загальній структурі витрат для зварювання типових елементів баку в рамках річної програми становить 56 %. В результаті скорочення маси наплавленого металу при лазерному та гібридному зварюванні доля витрат на зварювальні матеріали становить відповідно 19 і 29 %.

Витрати на зарплату спеціалістам для здійснення лазерного та гібридного зварювання з відраху-

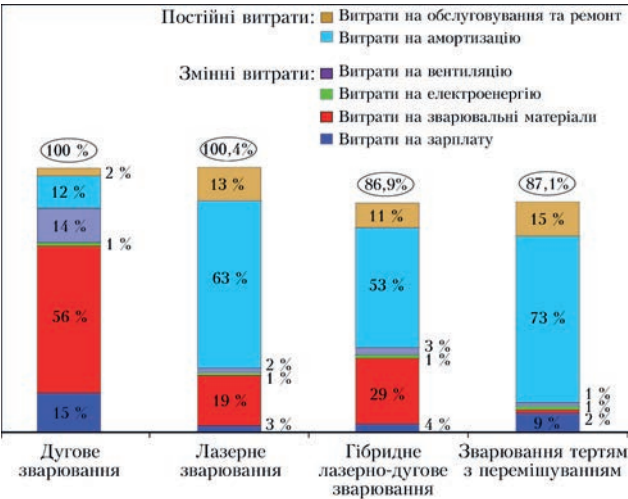


Рис. 6. Структура витрат на зварювання паливних баків стрингерної конструкції при виконанні річної програми, грн

Таблиця 4. Попередні розрахунки витрат на зварювання паливних баків стрингерної конструкції для виконання річної програми

Найменування витрат	Дугове зварювання		Лазерне зварювання		Гібридне лазерно-дугове зварювання		Зварювання тертям з перемішуванням	
	грн.	%	грн.	%	грн.	%	грн.	%
Змінні витрати	12 101 803	85,0	3 472 641	24,3	4 574 261	37,0	1 573 843	12,7
Витрати на зарплату	2 147 324	15,1	389 320	2,7	469 660	3,8	1 097 322	8,9
Витрати на зварювальні матеріали (робочий інструмент)	7 911 550	55,6	2 711 898	19,0	3 598 679	29,1	239 000	1,9
Витрати на електроенергію	99 882	0,7	104 535	0,7	161 230	1,3	57 521	0,5
Витрати на вентиляцію	1 943 047	13,6	266 888	1,9	344 692	2,8	180 000	1,5
Постійні витрати	2 134 000	15,0	10 818 000	75,7	7 794 000	63,0	10 818 000	87,3
Витрати на амортизацію	1 779 000	12,5	9 015 000	63,1	6 495 000	52,5	9 015 000	72,7
Витрати на обслуговування та поточний ремонт	355 000	2,5	1 803 000	12,6	1 299 000	10,5	1 803 000	14,5
Витрати, усього	14 235 803	100	14 290 641	100	12 368 261	100	12 391 843	100

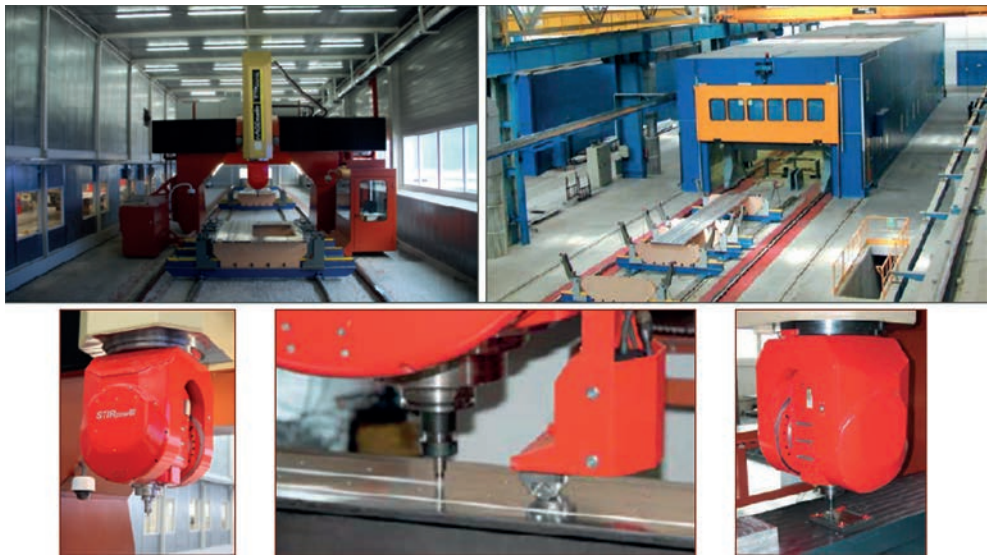


Рис. 7. Приклад обладнання HAGEMATIC 305 FSW з фрезерно-зварювальною голівкою STIRPOWER 300 для високошвидкісного фрезерування та ЗТП для з’єднання габаритних плоских секцій

ваннями в структурі витрат на зварювання річної програми дорівнюють 3 і 4 % відповідно, В абсолютних величинах вони в 4...5 рази менші порівняно з витратами на зарплату робочим, які володіють дуговими способами зварювання. У випадку зварювання тертям з перемішуванням затрати на зарплату в 2 рази нижче, ніж при дуговому зварюванні.

Затрати на електроенергію в загальній структурі витрат при виконанні річної програми незалежно від способу зварювання не перевищують 1,5 %.

Ще однією важливою статтею витрат, яку необхідно враховувати при економічній оцінці різних способів зварювання, є витрати на вентиляцію промислового приміщення зварювальної ділянки, а також підігрівання повітря, яке при цьому використовується. В структурі витрат найбільша її величина (14 %) спостерігається у випадку зварювання конструкції баку дуговим способом, оскільки при цьому виділяється найбільша кількість зварювального аерозолі в навколишнє середовище. Для інших способів зварювання доля витрат на вентиляцію не перевищує 3 %.

Найбільша вартість основного зварювального обладнання відмічається у випадку, коли для з’єднання залучають процес ЗТП, який характеризується значними технологічними перевагами порівняно з вищезгаданими способами зварювання плавленням. Основною особливістю ЗТП є можливість отримання високої якості з’єднань без розплавлення основного металу при пластичному деформуванні. Мала величина тепловкладення в процесі зварювання позитивно впливає на ступінь зниження міцності металу в зоні нагрівання і деформації зварних виробів. Серед недоліків такої технології є висока вартість зварного обладнання. Так, загальна вартість установок світових лідерів стартує з мітки 1,5 млн дол. США (рис. 7). В СНГ

таке обладнання не випускається. Мають місце окремі підприємства, які пропонують робочий інструмент для здійснення такого способу зварювання сталей малої міцності, а також сплавів на основі алюмінію, міді та нікелю.

Вартість обладнання для лазерного та гібридного зварювання коливається в межах від 500 тис. дол. до декілька млн дол. США.

Для наочності залежності технологічної собівартості від виду конструкцій на рис. 8 надані результати розрахунків сумарних витрат при виконанні процесу зварювання одного комплексу вафельних паливних баків.

Оптимізація витрат на амортизацію, поточний ремонт та обслуговування, які є найбільші за величиною, за рахунок зниження вартості зварювального обладнання можлива при реалізації операцій ЗТП на базі центрів металообробки, продольнофрезерних, поздовжньострогальних і інших металорі-

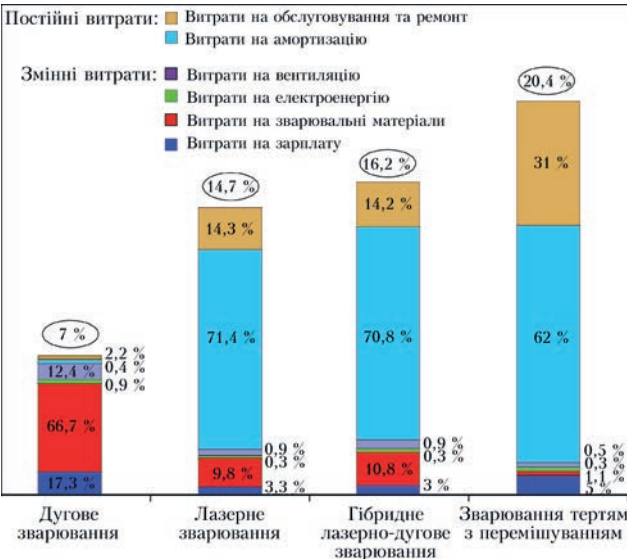


Рис. 8. Технологічна собівартість зварювання одного комплексу паливних баків вафельної конструкції

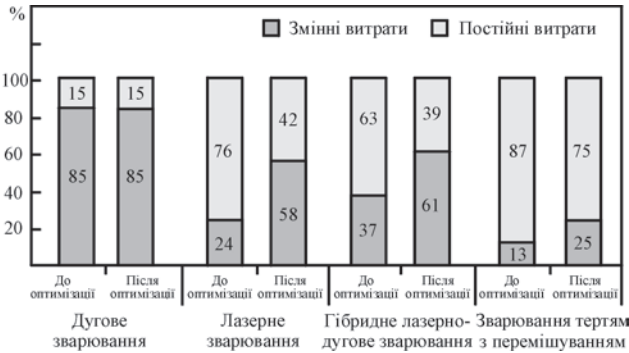


Рис. 9. Співвідношення між змінними та постійними витратами на виконання зварювання стрингерних паливних баків

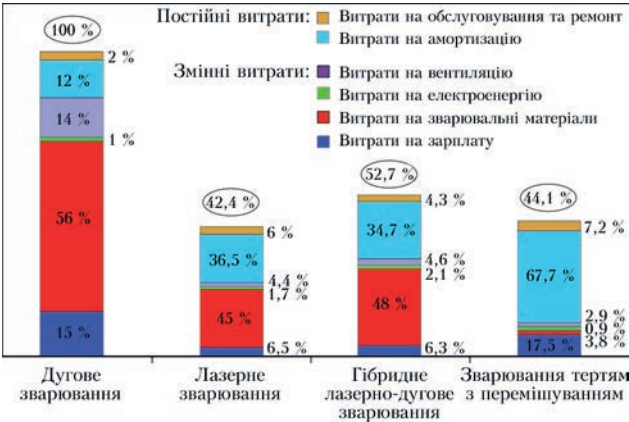


Рис. 10. Технологічна собівартість зварювання одного комплексу паливних баків стрингерної конструкції після оптимізації.

зальних верстатах, що оснащено головками для ЗТП, а для лазерного та гібридного зварювання — використання вітчизняних установок з імпорфтними лазерами. Це дозволяє змінити співвідношення між змінними та постійними витратами (рис. 9).

На рис. 10 представлено структуру технологічної собівартості зварювання одного комплексу паливних баків стрингерної конструкції після оптимізації.

Розрахунок повних витрат на проведення зварювальних робіт, тобто з урахуванням витрат на проведення поточного ремонту, обслуговування та амортизацію обладнання, які представляють собою вартість даного обладнання, при виготовленні однієї конструкції баку підвищує суму витрат у разі, коли використовуються високотехнологічні

способи зварювання — лазерне, гібридне, а також тертям з перемішуванням. Слід відмітити, що це не додає принципових змін економічному ранжуванню способів зварювання, які розглядаються у даному дослідженні.

Співставлення витрат на зварювання паливних баків вафельної та стрингерної конструкції одно-значно свідчить про економічну доцільність використання в першу чергу лазерного та гібридного способів зварювання (табл. 5 та рис. 11).

Рівень трудомісткості дугового способу з’єднання конструктивних елементів при виготовленні паливних баків в 3,0...3,5 разів перевищує трудомісткість при використанні лазерного або гібридного способу. Це робить дугову технологію неконкурентоздатною, не дивлячись на більш низьку вартість зварювального обладнання. Тим не менш, необхідно зазначити, що цей дуговий спосіб зварювання може розглядатися в якості ремонтної технології або як частковий варіант технології виготовлення одиничних зразків дослідних моделей виробів космічної техніки.

Таким чином, серед розглянутих способів зварювання з точки зору економічної доцільності слід віддати перевагу способу зварювання тертям, але після того, як будуть встановлені вихідні дані, тобто після завершення досліджень структури та фізико-механічних властивостей зварних з’єднань та розробки нормативної документації щодо виробничого технологічного процесу. Тим не менш, вже зараз можна очікувати значну економічну ефективність при застосуванні такої технології зварювання для виготовлення конструкцій паливних баків ракет-носіїв.

В теперішній час досліджуються технології з’єднання елементів конструкції паливного баку шляхом використання більш досконалих за структурою та властивостями алюмінієвих сплавів марок 2219, 2195 або 2198. Отримані результати щодо зварюваності та фізико-механічних властивостей зварних з’єднань дозволяють прогнозувати заміну традиційних сплавів в конструкції паливного баку на нові сплави. Значні габарити паливних баків зумовлюють доцільність виконання процесу зварювання у вертикальному положенні. При цьому можливе переміщення конструкції баку відносно платформи

Таблиця 5. Кваліметричне ранжування способів зварювання паливних баків за економічними показниками

Критерії	Дугове зварювання	Лазерне зварювання	Гібридне лазерно-дугове зварювання	Зварювання тертям з перемішуванням
Заробітна плата	4	1	2	3
Зварювальні матеріали	4	2	3	1
Електроенергія	2	3	4	1
Вентиляція	4	2	3	1
Амортизація	1	2	3	4
Поточний ремонт	2	3	1	4
Σ	17	13	16	14
Σ загальні витрати	4	1	3	2
ΣΣ	21	14	19	16

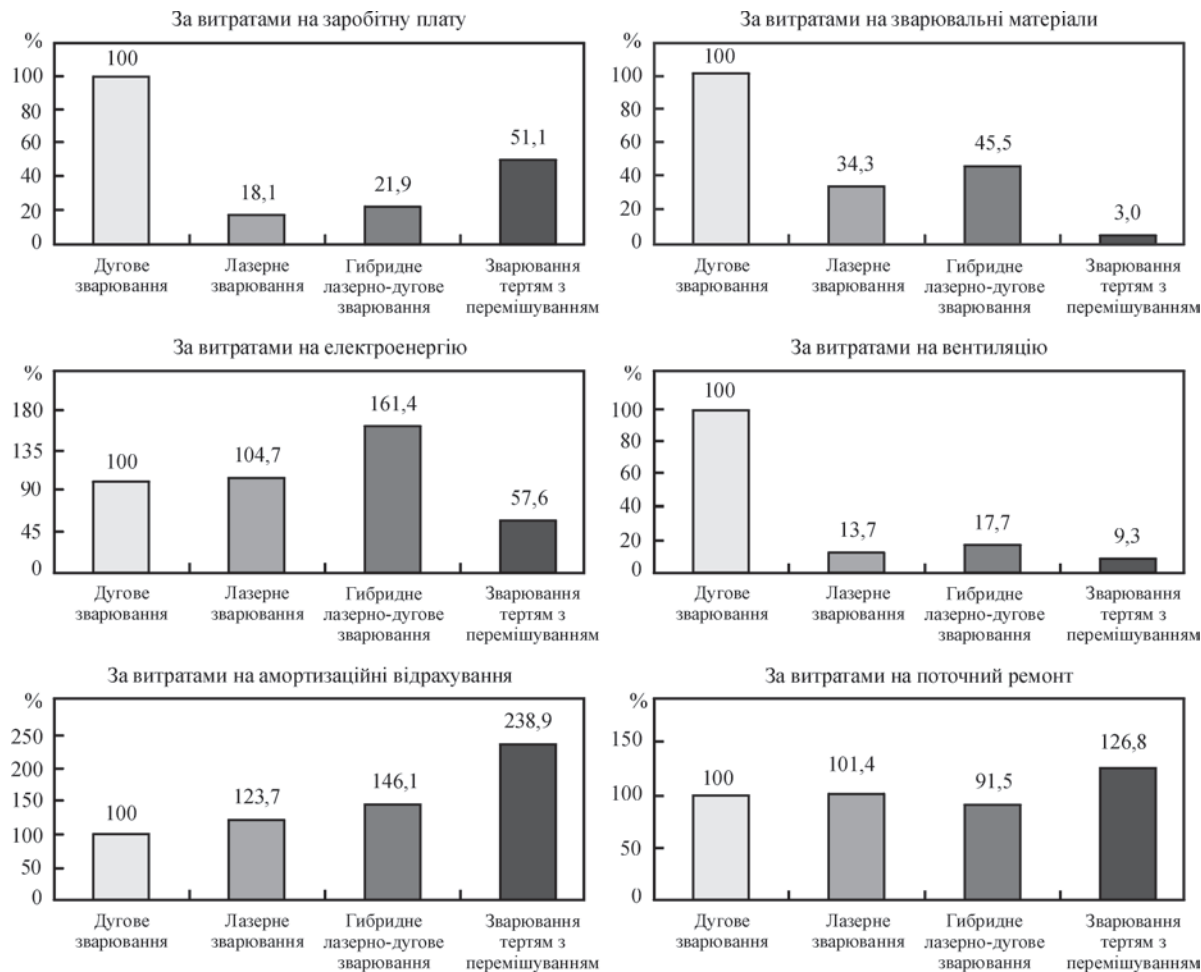


Рис. 11. Ранжування способів зварювання паливних баків стрингерної панелі після оптимізації

зі зварювальним устаткуванням. За кордоном завершується широкомасштабне дослідження експлуатаційних властивостей зварних з'єднань та розробка нової технологічної документації. Така стратегія виробництва сприяє розширенню сфери застосування як нових сплавів алюмінію, так і відпрацюванню способів їх зварювання. Мала величина погонної енергії зварювання при ЗТП створює необхідні для формування зварного шва теплофізичні умови. Отже, реалізуються умови, за яких деформується вже твердий розчин, який розплався, що позитивно проявляється на значеннях фізико-механічних властивостей зварних з'єднань, ступеня зниження міцності металу в зоні нагрівання, деформації зварних виробів. В результаті підвищуються показники надійності конструкції паливних баків та тактико-технічні характеристики ракет-носіїв.

Комплексний аналіз економічної ефективності технічних рішень проводили за таким алгоритмом розрахунків:

- маси конструкції ЦТ ТО1 (традиційне рішення);
- зміни маси конструкції ЦТ ТО1 (нове рішення);
- зміни маси ПГ (нове рішення);
- зміни вартості пуску (нове рішення);
- маси і вартості матеріалу ЦТ ТО1 (традиційне рішення);

- зміни маси і вартості матеріалу ЦТ ТО1 (нове рішення);
- зміни витрат на матеріали ЦТ ТО1 (нове рішення);
- способів зварювання та сумарної довжини швів ЦТ ТО1 (традиційне рішення);
- зміни способу зварювання та сумарної довжини швів ЦТ ТО1 (нове рішення);
- зміни витрат на виконання зварювальних робіт при виготовленні ЦТ ТО1 (нове рішення);
- вартості пуску (традиційне рішення);
- зміни економічної ефективності, яка пов'язана зі зміною вартості пуску (маси ПГ) та загальних витрат на виготовлення ЦТ ТО1 (витрати на матеріали та проведення зварювальних робіт) (нове рішення).

Технологічні витрати на дугове зварювання при виготовленні паливних баків (табл. 6) складають 5324 тис. дол. США, при лазерному та лазерно-дуговому відповідно 1529 тис. дол. США та 2013 тис. дол. США, а найнижчий показник 697 тис. дол. США при застосуванні зварювання тертям з перемішуванням.

Витрати на запуск наплавленого металу при застосуванні дугового зварювання 2600 тис. дол. США, при використанні лазерного та лазерно-дугового

Таблиця 6. Показники економічної ефективності способів зварювання

Технологія зварювання	Маса наплавленого металу, кг	Витрати на запуск 1 кг грузу, дол. США	Витрати на запуск наплавленого металу, тис. дол. США	Технологічні витрати на зварювання, тис. дол. США	Витрати, усього, тис. дол. США
Дугове	325	8000	2600	5324	7924
Лазерне	113	8000	904	1529	2433
Гібридне	150	8000	1200	2013	3213
ЗТП	35	8000	280	697	977

Таблиця 7. Попередні результати комплексного аналізу економічної ефективності технічних рішень

Конструкція	Маса конструкції ЦЧ ТО1, %	Витрати на матеріали, %	Витрати на зварювання, %	Інтегральний показник економічної ефективності, який приведений до вартості пуску, %
Вафельна, АМг6 (1201)	100	100	100	0
Стрингерна, АМг6 (1201)	98,4	29,9	699,5	0,3
Вафельна, 2195 (2198)	75,0	375,2	87,0	2,3
Стрингерна, 2195 (2198)	73,8	412,2	609,2	2,9

– відповідно 904 тис. дол. США та 1200 тис. дол. США, а найнижчий показник 280 тис. дол. США при застосуванні зварювання тертям з перемішуванням.

Результати комплексного аналізу економічної ефективності технічних рішень виготовлення паливних баків вафельної та стрингерної конструкції з різних матеріалів наведено в табл. 7.

Висновки

1. Значне підвищення економічної ефективності конструкції паливного баку першого ступеня ракети-носія можна очікувати за умов використання замість традиційного сплаву марки АМг6 на сучасні, наприклад, алюмінієво-літєві сплави, з більш високими фізико-механічними характеристиками, та шляхом розробки високопродуктивної технології їх зварювання.

2. Критерієм економічної оптимізації обрано ступінь зниження вартості пуску ракети внаслідок зменшення маси наплавленого металу при застосуванні розглянутих способів зварювання. З урахуванням цього критерію найбільш оптимальним можуть вважатися інноваційні способи зварювання у твердій фазі – тертям з перемішуванням або лазерне зварювання плавленням. Вибір способу зварювання визначається експлуатаційними вимогами до зварної конструкції.

3. Для забезпечення високого рівня тактико-технічних характеристик конструкції ракети-носія актуальним залишається розробка та промислове впровадження зазначених інноваційних технологій зварювання, які гарантовано дозволяють отримати високу якість швів нероз'ємних з'єднань, підвищення їх фізико-механічних характеристик, мінімізацію термомеханічного впливу процесу зварювання на структуру та властивості основного металу. Для реалізації встановлених задач сучасного технологічного переоснащення виробничої бази та широкого промислового використання ефективного устаткування поряд з більш досконалими зварювальними технологіями необхідно визначити та економічно обґрунтувати об'єми їх застосування та вартість.

Список літератури

1. Патон Б.Е. (2018) Сварка в ракетно-космической промышленности. *Космична наука і технологія*, 24, 5, 4–9.
2. Андришкин А.Ю., Галинская О.О., Сигаев А.Б. (2015) *Производство сварных конструкций в ракетно-космической технике: учебное пособие*. СПб., Балт. гос. техн. ун-т.
3. Ищенко А.Я., Лабура Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов: монография*. Киев, Наукова думка.
4. Фудзивара Т. (2001) Технологии соединения легких металлов в авиационной и космической технике. *Кэйкиндзоку ёсэцу*, 39, 3, 1–11.
5. Kiyoto, S. (1993) Materials and joining technologies for rocket structures. *J. of the Japan welding society*, 62, 8, 46–52.
6. Каблов Е.Н. (2000) Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века. *Перспективные материалы*, 3, 27–36.
7. Махин И.Д., Носачев С.Н., Усов П.А. (2014) Особенности применения технологии автоматической импульсной лазерной сварки. *Космическая техника и технологии*, 4, 7, 54–61.
8. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Е.Н. Иода (2017) Структура и свойства сварных соединений сплавов В-1579 и В-1481, выполненных лазерной сваркой. *Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ»*, 7. Режим доступа: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1129
9. Шиганов И.Н., Холопов А.А., Трушников А.В. и др. (2016) Лазерная сварка высокопрочных алюминий-литиевых сплавов с присадочной проволокой. *Сварочное производство*, 6, 44–50.
10. (2019) Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов при изготовлении РКТ. *РИТМ машиностроения*, 7, 36–39.

Referemces

1. Paton, B.E. (2018) Welding in rocket and space industry. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, 24(5), 4–9 [in Russian].
2. Andryushkin, A.Yu. Galinskaya, O.O., Sigaev, A.B. (2015) *Producing of welded structures in rocket and space engineering: Manual*. St. Petersburg, BGUTU [in Russian].
3. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys: Monography*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Fudjiwara, T. (2001) Joining technologies of light metals in rocket and space engineering. *J. of Japan Institute of Light Metals*, 39(3), 1–11.
5. Kiyoto, S. (1993) Materials and joining technologies for rocket structures. *J. of the Japan Welding Society*, 62(8), 46–52.
6. Kablov, E.N. (2000) Main trends of development of materials for aerospace engineering of 21st Century. *Perspectivnye Materialy*, 3, 27–36 [in Russian].
7. Makhin, I.D., Nosachev, S.N., Usov, P.A (2014) Peculiarities of application of technology of automatic pulsed laser welding. *Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologii*, 4(7), 54–61 [in Russian].

8. Skupov, A.A., Panteleev, M.D., Ioda, E.N. (2017) Structure and properties of joints of alloys V-1579 and V-1481 performed by laser welding. *Trudy VTAM*, 7 [in Russian]. http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1129

9. Shiganov, I.N., Kholopov, A.A., Trushnikov, A.V. et al. (2016) Laser welding with filler wire of high-strength aluminium-lithium alloys. *Svaroch. Proizvodstvo*, 6, 44–50 [in Russian].

10. (2019) Friction stir welding of aluminium alloys in manufacturing of RST. *RITM Mashinostroeniya*, 7, 36–39 [in Russian].

ECONOMIC OPTIMIZATION OF THE METHODS OF WELDING THE STRUCTURES OF FUEL TANKS FOR AEROSPACE ENGINEERING

L.M. Lobanov¹, O.P. Kushnar'ov², O.A. Mazur¹, T.M. Labur¹, I.L. Snegirov², S.V. Pustovoi¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²SC M.K.Yangel DB «Pivdenne». 3 Kryvaryzhska Str., 349008, Dnipro, Ukraine. E-mail: info@yuzhnoye.com

Welding and other related technologies are used in manufacture of space vehicles. When developing the designs of third generation rockets, special attention is paid to problems of improvement of flight reliability and safety characteristics that is ensured by rational application of new types of high-performance welded joints in the design, which are produced due to introduction of effective welding processes. Fabrication of the traditional (waffle) structure and advanced (stringer) structure was analyzed, taking into account the cost-effectiveness of application of the welding processes. In terms of cost-effectiveness, it is rational to apply friction stir welding. Here, a considerable economic effect of application of friction stir welding technology for fabrication of structures of fuel tanks of rocket carriers is anticipated. 10 Ref., 7 Tabl., 11 Fig.

Keywords: aluminium alloys, arc welding, laser welding, hybrid laser-arc welding, friction stir welding, economic expenses, research

Надійшла до редакції 20.01.2022

ПЕРЕДПЛАТА 2022

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

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.
** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково перекладі на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

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

Передплата на електронну версію журналів.
Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

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

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

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.
Перша сторінка обкладинки – 200х200 мм.
Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200х290 мм.
Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200х290 мм.
Вклейка А4 – 200х290 мм. Розворот А3 – 400х290 мм.
А5 – 185х130 мм.
Розміри журналів після обрізу 200х290 мм.
Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель CMYK, роздільна здатність 300 dpi.



ВИДАВНИЦТВО

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

СИСТЕМИ ГІГІЄНИЧНОЇ ОЦІНКИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ В УКРАЇНІ (Частина 1)

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

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

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

Метою статті було розроблення єдиної системи гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів у відповідності зі стандартами серії ДСТУ ISO 15011 та обґрунтування доцільності її застосування. Пояснено сутність проблеми коректної порівняльної гігієнічної оцінки вітчизняних і закордонних зварювальних матеріалів. Наведено шляхи вдосконалення методики дослідження показників рівнів виділень та хімічного складу зварювальних аерозолів за рахунок застосування стандартів ДСТУ ISO 15011. Охарактеризовано спектр вимог кожного із стандартів зазначеної серії. Розписано основні процедури гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів, їх специфіку та послідовність, а також основні показники, за якими вона здійснюється. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: зварювальні матеріали, гігієнічна оцінка, зварювальний аерозоль, повітрообмін, граничне значення зварювального аерозолю

Вступ. Серед показників якості зварювальних матеріалів, від яких залежить їх конкурентоздатність на світовому ринку, у наш час важливого значення набувають і їх гігієнічні характеристики. Відсутність єдиної системи оцінки гігієнічних характеристик зварювальних матеріалів, зокрема їх токсичності, не дозволяє виконувати первинну порівняльну гігієнічну оцінку зварювальних матеріалів українського виробництва з закордонними з метою вибору кращих в гігієнічному відношенні, а також розробити нові матеріали з урахуванням європейських вимог охорони праці. Для проведення таких порівняльних досліджень необхідно користуватися прийнятими в Європі методиками, тобто стандартами серії ISO 15011 [1–4], які нещодавно були гармонізовані в Україні за участю авторів даної статті у вигляді Національних стандартів серії ДСТУ ISO 15011 [5–8].

Виклад основного матеріалу. Незважаючи на подальший розвиток дугового зварювання та розширення асортименту зварювальних матеріалів, Україна ризикує втратити свої позиції на світовому ринку. Основною причиною такої тенденції є невідповідність якості зварювальних матеріалів міжнародним стандартам. Тому основною метою нинішнього виробництва є випуск конкурентоспроможної продукції на світовий ринок. Серед показників якості зварювальних матеріалів важливе значення мають і санітарно-гігієнічні показники. У відповідності з сучасними міжнародними стандартами, сертифікати якості на зварювальні матеріали повинні видаватися з урахуванням гігієнічних вимог.

Удосконалення методики дослідження показників рівнів виділень та хімічного складу зварювальних аерозолів з урахуванням вимог стандартів ДСТУ ISO 15011. Нормативні документи з охорони праці у зварювальному виробництві, які діяли до останнього часу в Україні, давно застаріли й перестали відповідати сучасним вимогам. Методичні вказівки з гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів і способів зварювання [9, 10], прийняті ще у 1980 р., зводилися тільки до визначення питомого виділення зварювального аерозолю (ЗА) і розрахунку необхідного повітрообміну у виробничому приміщенні. У європейських країнах користувалися методикою, запропонованою Міжнародним інститутом зварювання, що полягала у визначенні двох показників: гранично допустимої концентрації ЗА (мг/м³) як міри токсичності ЗА і номінальної гігієнічної вимоги до повітрообміну (м³/хв) як ступеня впливу ЗА на організм зварника [11]. Тому через розходження в методиках коректно провести порівняльну гігієнічну оцінку наших зварювальних матеріалів з європейськими було неможливо.

Для проведення таких порівняльних досліджень необхідно користуватись прийнятими у нашій країні гармонізованими методичними Міжнародними стандартами серії ДСТУ ISO 15011 [5–8] «Охорона здоров'я і безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбору аерозолів та газів, що утворюються під час дугового зварювання».

У частині стандарту ДСТУ ISO 15011-1:2008 [5] наведено вимоги до відбору проб і хімічного аналізу зварювальних аерозолів, в ДСТУ ISO 15011-2:2008 – до визначення рівнів виділення газів (крім озону), що утворюються при зварюванні, в ДСТУ

ISO 15011-4:2008 – до форми протоколу представлення результатів гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів, а в ДСТУ ISO/TS 15011-5:2008 – до визначення рівнів виділення продуктів теплового розкладання органічних матеріалів в результаті зварювання або різання. Разом з тим ці стандарти не обмежують застосування методик визначення шкідливих речовин, прийнятих у різних країнах.

Згідно ДСТУ ISO 15011-1:2008 [5], наведений метод використовується для визначення рівня виділень аерозолів, що утворюються під час дугового зварювання, та проведення відбору аерозолів для хімічного аналізу. Процес уловлювання здійснюється з використанням витяжної шафи. Можлива схема конструкції витяжної шафи, спроектованої для ручного дугового зварювання, MIG-зварювання і MAG-зварювання згідно даного стандарту, наведена на рис. 1. Верхня секція витяжної шафи включає витяжну трубу діаметром 200 мм і висотою 300 мм, яка приєднується до верхівки зварювальної камери, та комплект фільтра для відбирання аерозолів, що закріплюється на верхівці витяжної труби і приєднується до насосного агрегату. Загальна висота комплексу фільтра над основою складає приблизно 700 мм. Зварювальна камера складається з пірамідоподібної камери для випробувань з нижньою юбкою. Висота юбки 100 мм і висота піраміди 300 мм (загальна висота зварювальної камери – 400 мм). Зварювальна камера повинна бути достатньо великою для відбирання аерозолів. Розміри основи камери 500×500 мм. Витяжна шафа повинна бути спроектована таким чином, щоб зменшити осадження зварювальних аерозолів на внутрішній поверхні шафи.

У дослідницькій лабораторії Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона для проведення таких досліджень ЗА використовується удоскона-

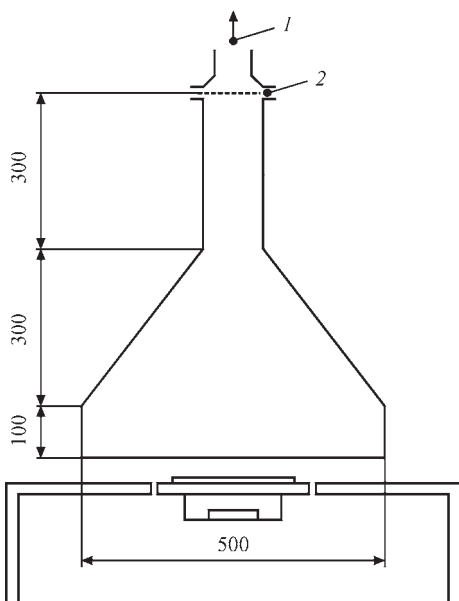


Рис. 1. Витяжна шафа: 1 – система всмоктування; 2 – фільтр

лена витяжна шафа відповідно до вимог міжнародного стандарту (рис. 2).

Схематично процес уловлювання ЗА показано на рис. 3.

Камера фільтротримача являє собою рознімну конструкцію зі сталі, що складається із двох пірамідоподібних частин, скріплених між собою спеціальними петлями, що закриваються замком. Зовнішніми опорними поверхнями пірамідоподібних частин затискається фільтр. Повітря з аерозолем, що всмоктується, проходить через забірне сопло, гнучкий шланг, фільтр, де ЗА осаджується, а потім виходить через повітропровід збуджувача тяги.

Під час визначення інтенсивності виділення ЗА вони осідають на фільтри з тканини ФПП-15-1,5 і на фільтри АФА-ХА-18 для наступного хімічного аналізу проб ЗА. Ці фільтри відповідають вимогам стандарту, можуть витримувати перепади

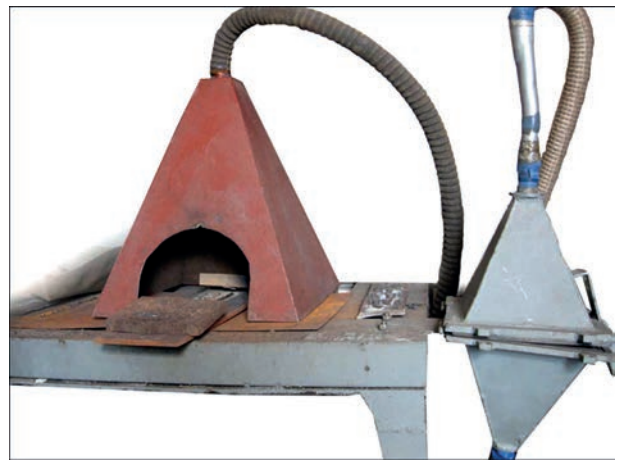


Рис. 2. Стенд для відбору проб ЗА при ручному зварюванні покритими електродами

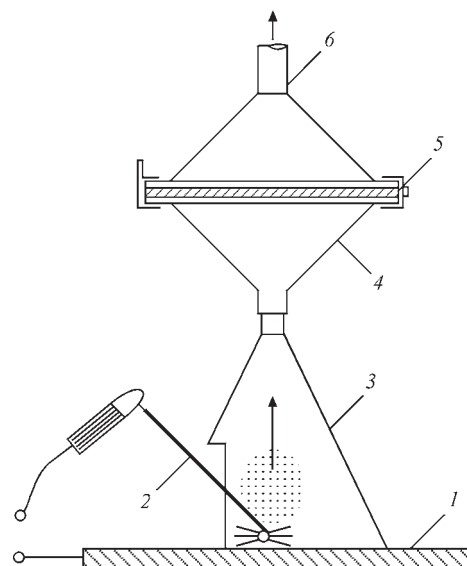


Рис. 3. Схема стенду для відбору проб ЗА при ручному зварюванні покритими електродами: 1 – метал, що зварюється; 2 – зварювальний електрод; 3 – пірамідоподібне уловлювальне сопло (укриття зони зварювання); 4 – камера фільтротримача (вимірювально-розподільна камера); 5 – фільтр для хімічного аналізу; 6 – патрубок до аспіратора

тиску і мають здатність затримувати аерозолі з концентрацією від 0,4 до 1,2 мг/см². Мінімальна продуктивність фільтру 99,5 %. Для уникнення забивання фільтру використовують фільтри діаметром приблизно 250 мм. Пристрій для підтримки фільтра повинен щільно прилягати до фільтра та бути зручним під час його замінювання.

В якості збуджувача тяги використовується аспіраційний пристрій потужністю 600...1000 Вт, що забезпечує відсмоктування повітря в межах 800...1000 дм³/хв при розрідженні повітря не нижче 8000 Па. Він забезпечує потік, достатній для утримування аерозолі всередині витяжної шафи під час зварювання та очищення витяжної шафи від ЗА після завершення зварювання.

Вимірювання напруги дуги та зварювального струму здійснюється за допомогою вольтметра та амперметра, установлених на зварювальному обладнанні, з класом точності 0,5, що відповідає міжнародним вимогам до електричних рекордерів. Час горіння дуги встановлюється за допомогою таймера зі шкалою не більше 0,1 с, у даному випадку це секундомір.

Маса відібраних часток ЗА визначається вагами з чутливістю не менше 1 мг. Для проведен-

ня дослідних експериментів ми використовуємо аналітичні ваги рівноплечеві 2-го класу моделі ВЛР-200.

З введенням в дію нового стандарту [7] усі характеристики зразків та матеріалів для зварювання повинні бути внесені до протоколу про випробування (таблиця). Вибір зразка для випробування та зварювального матеріалу повинен відповідати процесу і умовам зварювання.

Зварювання проводять всередині витяжної шафи під час роботи аспіратора. Зварювальні аерозолі, що утворюються під час зварювання, уловлюються спеціальним фільтром.

Послідовність випробування:

- зразок для випробування необхідно розмістити безпосередньо на металевій пластині всередині витяжної шафи;
- зважений фільтр розміщується на пристрої для відбору проб;
- вмикається аспіратор.

Під час зварювання засікають час горіння дуги. Аспіратор залишається ввімкненим для продовження всмоктування не менше 30 с після закінчення зварювання (вимикання дуги). Фільтр із

Протокол випробувань

Дата випробування:	Оператор				Посилання	
Процес: Вид зварювання:					Тип витяжної шафи	
Зварювальний матеріал:	Виробник/фірмова назва товару: Назва матеріалу для зварювання: Партія: Діаметр: Примітки:				Стандарт	
Зразок для випробування:	Основний метал: Розміри: Умови поверхні: Примітки:				Стандарт	
Захисний газ:	Торгова марка: Склад: Швидкість подачі: Примітки:				Стандарт	
Обладнання для зварювання і контролю:	Джерело струму (Торгова марка і тип джерела): Обладнання для записування:					
Деталі вимірювання	Тест 1	Тест 2	Тест 3	Тест 4	Тест 5	Одиниці вимірювання
Зварювання (ручне/механізоване)						
Напруга дуги, полярність						В, РС(+), РС(-), ЗМ
Струм дуги						А
Характеристика пульсації (якщо застосовується)						
Швидкість подачі дроту (якщо застосовується)						м/хв
Виліт електрода						мм
Швидкість зварювання						см/хв
Примітки						
Час горіння дуги						с
Вага фільтру після випробування						мг
до випробування						мг
Маса твердих мікрочастинок аерозолію						мг
Середнє значення рівня виділень						мг/с
Хімічний склад аерозолів при зварюванні:						% (м/м)
Інші примітки:						

відібраною пробкою ЗА одразу вилучають із витяжної шафи та знову зважують. Для аналізу зібрані тверді мікрочастинки аерозолію необхідно одразу вилучити з фільтра і зберігати в герметичній скляній колбі. Із фільтрами необхідно поводитись обережно і намагатися не забруднити їх пилом чи масними плямами від пальців до і після випробування. Випробування продовжують до тих пір, поки не зібрано хоча б 0,1 г аерозолію, не допускаючи забивання фільтру.

Випробування вважається дійсним якщо:

- аерозоль не виходить із витяжної шафи;
- температура зварювальної камери не надто підвищилась, що призводить до конденсації аерозолію на внутрішніх стінках камери.

Для визначення рівня (інтенсивності) виділень виконуються три випробування і визначається середнє значення. Якщо окремі результати відрізняються більше ніж на $\pm 10\%$ від середнього, виконуються ще два випробування і визначається середнє значення з п'яти результатів. Рівень виділень аерозолів FER (виражається в міліграмах аерозолів, що виділяються за секунду зварювання, м/с) розраховується у відповідності зі стандартом ДСТУ ISO 15011-4:2008 [7]:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{t}, \quad (1)$$

де m_1 – маса фільтру перед зварюванням (мг); m_2 – маса фільтру після зварювання (мг); t – час горіння дуги (с).

Хімічний склад ЗА (компонентів), які аналізуються, залежить від зварювального процесу і зварювального матеріалу.

Методика дослідження рівня виділення газів також була удосконалена з урахуванням вимог нового стандарту ДСТУ ISO 15011-2:2008 [6] і виконується згідно з методичними вказівками [10]:

Методика визначення рівнів виділень газів, що утворюються під час дугового зварювання, як і метод визначання ЗА також базується на використанні витяжної шафи.

Під час дугового зварювання можуть утворюватися такі гази:

- чадний газ (CO);
- вуглекислий газ (CO_2);
- оксид азоту (NO);
- діоксид азоту (NO_2).

Витяжну шафу можна також використовувати для виявлення фтористих газів, що утворюються під час зварювання матеріалами, у складі яких присутні сполуки фтору, та органічних газів, які утворюються під час дугового зварювання покритих металів, наприклад, ґрунтом, фарбою або пластмасовим матеріалом. Хімічний склад аерозолію залежить від природи покриття, при цьому необхідно ідентифікувати більше 100 органічних продуктів розпаду. Однак

лише декілька органічних газів, що утворюються, можуть перевищувати гранично допустиму концентрацію і негативно впливати на працюючого.

Дугове зварювання виконується у витяжній шафі. Під час проведення експерименту гази, що утворюються, безперервно відсмоктуються з витяжної шафи за допомогою вентилятора або насоса. Рівень виділень газів розраховується множенням концентрації газу у вихідному повітрі на рівень повітряного потоку.

Більшість процесів дугового зварювання супроводжуються утворенням складних хімічних сполук зварювального аерозолію та газів. Необхідно звернути особливу увагу й на можливість взаємодії одного газу з іншим. Концентрацію газів, що утворюються під час зварювання у витяжній шафі, можна визначати, використовуючи прямі або непрямі методи [6].

Розроблення системи гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів. Гігієнічна оцінка зварювальних матеріалів полягає у виконанні певної послідовності різних видів випробувальних робіт та процедур, які до цього часу не були достатньо регламентовані нормативними документами. Міжнародні ж стандарти ISO 15011 [1–4] та відповідні Національні ДСТУ ISO 15011 [5–8] саме для цього призначені. Тому наша робота щодо створення власної системи гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів на першому етапі полягала у перекладі на українську мову та редагуванні даних стандартів і на другому – у перевірці та приведенні у відповідність з ISO 15011 прийнятих в Україні методик.

Послідовність процедур гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів в загальному вигляді можна представити наступним чином.

1. Відбирання проб зварювальних аерозолів (ЗА) та газів у відповідності з ДСТУ ISO 15011-1:2008 (Частина 1: Визначення рівня виділень і відбір проб для аналізу мікрочастинок аерозолів) та визначення хімічного складу ЗА.

2. Визначення рівнів виділень газів згідно з ДСТУ ISO 15011-2:2008 (Частина 2: Визначення рівня виділень газів, за винятком озону) та ISO 15011-3 (Частина 3: Визначення рівня виділень озону).

3. Визначення гігієнічних показників зварювальних матеріалів у відповідності з ДСТУ ISO 15011-4:2008 (Частина 4: Форма для запису даних про аерозолі).

Згідно з даними стандартами спочатку визначаються первинні показники гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів: рівні виділень ЗА за допомогою гравіметричного (вагового) методу шляхом відбирання проб ЗА в процесі зварювання і хімічний склад ЗА – фізико-хімічними методами, а визначення токсичності ЗА (кінцеві показники) – розрахунковим методом.

Для визначення хімічного складу ЗА у відповідності зі стандартом ДСТУ ISO 15011-1:2008 рекомендовано застосування таких фізико-хімічних методів:

- для визначення вмісту Al, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn тощо – атомна емісійна спектроскопія, маспектроскопія; атомна абсорбційна спектроскопія, атомна флуоресцентна спектроскопія, рентгенівська флуоресцентна спектроскопія;
- для визначення шестивалентного хрому (Cr(VI)) – іонна хроматографія або спектроскопія;
- для визначення фторидів (F⁻) – іонна хроматографія або іонноелектродний аналіз.

Для визначення кінцевих показників гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів розрахунковим методом у відповідності до стандарту ДСТУ ISO 15011-4:2008 [7] користуються такими двома показниками:

- граничне значення зварювального аерозолію (більш повна назва – гранично допустима концентрація ЗА) як міра токсичності ЗА (відносна величина, що дозволяє порівняти токсичність ЗА однієї ваги, а не вплив на організм людини усього ЗА, що виділяється на робочому місці зварника);
- клас зварювального аерозолію, показник ризику впливу ЗА на організм людини на конкретному робочому місці (враховує усю кількість ЗА, що виділяється за певних умов зварювання).

Висновки

Таким чином, для розроблення системи оцінки токсичності зварювальних аерозолів передбачено користуватися стандартом [7], який дозволяє оцінити ступінь ризику шкідливого впливу зварювальних матеріалів, при їх використанні, на організм зварника. Такий підхід дає можливість провести адекватний порівняльний аналіз вітчизняних та імпортованих зварювальних матеріалів за відповідними показниками безпеки праці. Такими показниками є рівень виділень зварювального аерозолію, хімічний склад аерозолію, граничне значення зварювального аерозолію та клас зварювального аерозолію – показник ризику впливу аерозолію на організм людини на конкретному робочому місці за певних умов зварювання.

Список літератури

1. (2004) ISO 15011-4 *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases. Part 4: Fume data sheets*, 24.
2. (2002) ISO 15011-1 *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. Part 1: Determination of emission rate and sampling for analysis of particulate fume*, 10.
3. (2003) ISO 15011-2 *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. Part 2: Determination of emission rates of gases, except ozone*, 11.

4. (2006) ISO 15011-5 *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases. Part 5: Identification of thermal-degradation products generated when welding or cutting through products composed wholly or partly of organic materials*, 18.
5. (2011) ДСТУ ISO 15011-1:2008. *Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів, утворюваних під час дугового зварювання. Частина 1. Визначення рівня виділень і відбір проб для аналізу мікрочастинок аерозолів*. Переклад і наук.-техн. ред. О. Безушко, Ю. Бондаренко, О. Курочко, А. Левченко, О. Левченко. Чинний від 2008-08-15. Київ, Держспоживстандарт України, 8.
6. (2011) ДСТУ ISO 15011-2:2008. *Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів, утворюваних під час дугового зварювання. Частина 2. Визначення рівня виділень газів, за винятком озону*. Переклад і наук.-техн. ред. О. Безушко, Ю. Бондаренко, О. Курочко, А. Левченко, О. Левченко. Чинний від 2008-08-15. Київ, Держспоживстандарт України, 10.
7. (2011) ДСТУ ISO 15011-4:2008. *Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів. Частина 4. Форма для запису даних про аерозолі*. Переклад і наук.-техн. ред. О. Безушко, Ю. Бондаренко, О. Курочко, А. Левченко, О. Левченко. Чинний від 2008-08-15. Київ, Держспоживстандарт України, 20.
8. (2011) ДСТУ ISO/TS 15011-5:2008. *Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів. Частина 5. Ідентифікація продуктів теплової деградації, утворюваних під час дугового зварювання чи різання виробів, що цілком або частково складаються з органічних матеріалів*. Переклад і наук.-техн. ред. О. Безушко, Ю. Бондаренко, О. Курочко, А. Левченко, О. Левченко. Чинний від 2008-08-15. Київ, Держспоживстандарт України, 14.
9. (1980) Гигиеническая оценка сварочных материалов и способов сварки, наплавки и резки металлов – методические указания: (МУ 1927-78). Москва, Минздрав СССР, 15.
10. (1990) Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле (твердая фаза и газы): (МУ № 4945-88). Москва, Минздрав СССР, 150.
11. Походня И.К., Горпенюк В.К., Миличенко С.С. и др. (1990) *Металлургия дуговой сварки: процессы в дуге и плавление электродов*. Киев, *Наукова думка*, 224.

References

1. (2004) ISO 15011-4. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases. Pt. 4: Fume data sheets*, 24.
2. (2002) ISO 15011-1. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. Pt. 1: Determination of emission rate and sampling for analysis of particulate fume*, 10.
3. (2003) ISO 15011-2. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. Pt. 2: Determination of emission rates of gases, except ozone*, 11.
4. (2006) ISO 15011-5. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases. Pt. 5: Identification of thermal-degradation products generated when welding or cutting through products composed wholly or partly of organic materials*, 18.
5. (2011) DSTU ISO 15011-1:2008. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. Pt. 1: Determination of emission rate and sampling for analysis of particulate fume*. Ed.by O.Bezushko, Yu. Bondarenko et al. Valid from 2008-08-15. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 8 [in Ukrainian].
6. (2011) DSTU ISO 15011-2:2008. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. Pt. 2: Determination of emission rates of gases, except ozone*. Ed.by O. Bez-

- ushko, Yu. Bondarenko et al. Valid from 2008-08-15. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 10 [in Ukrainian].
7. (2011) DSTU ISO 15011-4:2008. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases. Pt. 4: Fume data sheets*. Ed.by O. Bezushko, Yu. Bondarenko et al. Valid from 2008-08-15. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 20 [in Ukrainian].
 8. (2011) DSTU ISO/TS 15011-5:2008. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases. Pt.5: Identification of thermal-degradation products generated when welding or cutting through products composed wholly or partly of organic materials*. Ed.by O. Bezushko, Yu. Bondarenko et al. Valid from 2008-08-15. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 14 [in Ukrainian].
 9. (1980) Hygienic evaluation of welding materials and methods of welding, surfacing and cutting: Guidelines, MU 1927-78. Moscow, Minzdraw SSSR, 15 [in Russian].
 10. (1990) *Guidelines on determination of harmful substances in welding fume (solid phase and gases)*, MU 4945-88. Moscow, Minzdraw SSSR, 150 [in Russian].
 11. Pokhodnya, I.K., Gorpenyuk, V.K., Milichenko, S.S. et al. (1990) *Metallurgy of arc welding: Processes in arc and melting of electrodes*. Kiev, Naukova Dumka, 224 [in Russian].

SYSTEMS OF HYGIENIC EVALUATION OF WELDING MATERIALS IN UKRAINE (Part 1)

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

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: office@paton.kiev.ua

The aim of the article was to elaborate a single system of hygienic evaluation of welding materials in accordance with the standards of DSTU ISO 15011 series and justify the appropriateness of its application. The essence of the problem of a correct comparative hygienic evaluation of domestic and foreign welding materials is explained. The methods of improvement of the procedure of studying indices of levels of emissions and chemical composition of welding fumes due to the application of DSTU ISO 15011 standards are presented. The scope of the requirements of each of the standards of the specified series is characterized. The main procedures of hygienic evaluation of welding materials, their specifics and sequence, as well as the main indices, based on which it is carried out, are highlighted. 11 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

Key words: welding materials, hygienic evaluation, welding fume, air exchange, boundary value of welding fume

Надійшла до редакції 18.01.2022

**XXI МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2022**
МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

**15 - 18
листопада**



Генеральний
інформаційний партнер:



Ексклюзивний
медіа партнер:

ЖУРНАЛ
ГОЛОВНОГО
ІНЖЕНЕРА



**МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**

м. Київ, Броварський пр-т, 15
станція метро «Лівобережна»

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

plast@iec-expo.com.ua

www.iec-expo.com.ua



Інтелектуальне палетування.

Спеціалізовані рішення для виконання будь-яких операцій від FANUC

Палетування вантажів є простою повторюваною операцією, яка ефективно роботизується, позбавляючи робітника монотонної та виснажливої роботи, а власника – незапланованих простоїв, пов'язаних з людським фактором. Промисловий робот може виконати цю роботу цілодобово – необхідно тільки забезпечувати доставку вантажу та піддонів на свої місця (обидва ці процеси також можуть бути роботизованими). Якщо Вам треба переміщувати важкі мішки, коробки, листи, ємності та тому подібні вантажі – робот для палетування буде відмінною інвестицією! Робототехнічний комплекс для переміщення вантажів дозволяє в автоматичному режимі маніпулювати вантажем, підвищувати продуктивність та знижувати вплив людського фактору, а ТОВ «САММІТ» допоможе Вам інтегрувати РТК з використанням промислових роботів від одного з провідних виробників РТК – **Fanuc** – у виробництво, використовуючи сучасні та надійні технології.

Потужні палетоукладачі, які дозволяють підвищити продуктивність.

Компанія **Fanuc** виробляє спеціалізовані роботи для палетування. Ці міцні палетоукладачі розроблено спеціально для того, щоб організувати роботу в безперервному режимі та скоротити тривалість циклів. Вони оснащені програмним забезпеченням, що адаптується, яке не потребує перепрограмування та має дуже велику вантажопідйомність. Тому

вони ідеально підходять для виконання будь-якої кількості як складних складських операцій, так і стандартних операцій палетування.

Висока швидкість з надзвичайно великою робочою зоною, мінімальними контурами перешкод і максимальною міцністю: роботи **Fanuc** для палетування включають все, що необхідно для ідеальної автоматизації. Результат – короткий час циклу та збільшена продуктивність у сукупності з невеликим потрібним простором та високою рентабельністю.

Функціонал роботів-палетайзерів:

- локалізація, ідентифікація, захоплення та переміщення упаковок або одиниць продукції;
- сумісна робота з конвеєрами, транспортерами;
- точне розміщення продукції на палетах;
- сортування з використанням зчитування кодів та маркувань;
- інші дії з пакування та викладки, в залежності від встановлених на маніпуляторі інструментів.

Висока продуктивність цілодобово.

Один з останніх кейсів ТОВ «Самміт» – роботизована лінія для автоматичного зварювання балонів вогнегасників.

Два роботи **Fanuc M-10iD-10L** виконують укладання деталей в установки для зварювання кільцевих швів. Відбір деталей з конвеєра та їх позиціонування виконані в автоматичному режимі установками з пневматичними приводами. Управління здійснюється від контролера РТК. Управління запуском зварювальної установки та відстежування стабільності зварювання виконується контролером РТК.

Дякуючи впровадженню даного РТК у виробництво було реалізовано головне завдання – інтеграція роботизованої системи в існуючу лінію конвеєра з мінімальною вартістю змін.

ТОВ «Самміт», офіційний системний інтегратор компанії Fanuc в Україні, пропонує комплексні роботизовані рішення «під ключ» для завдань з палетування та укладання, а також РТК для реалізації зварювальних завдань будь-якої складності. Ми проводимо складання, встановлення, налаштування та налагодження обладнання, навчання персоналу за індивідуальним запитом клієнта.



ТОВ «Самміт»

49089, м. Дніпро, вул. Суворова, 35
 тел.: +38 (067) 561-32-24, +38 (050) 661-32-24
 E-mail: dnepr@kemppti.in.ua
www.sammit.dp.ua, www.kemppti.in.ua

ПАЙКА – ПЕРСПЕКТИВНИЙ МЕТОД ОТРИМАННЯ З'ЄДНАНЬ

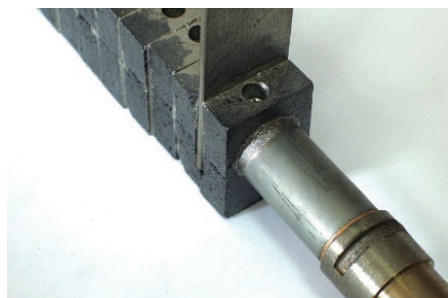
Фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона розробили технології та припої для пайки різних матеріалів в однорідному та різномірному поєднанні стосовно до приладобудування, атомної енергетики, термоядерного синтезу, авіакосмічної та автомобільної промисловості.



Модель дивертора Cu – W



Елемент дивертора Мо – С



Модель дивертора С – Мо – SS

Теплообмінник
Stainless steel IC 321Трубчасті з'єднання
Al + stainless steel IC 321

Антенa Al (3003)

Центробіжне колесо
IN 718Вузол фотоприймача
Ti – KovarТрубчасте з'єднання
Stainless steel IC 321

Календар березня*

01 березня 1936 року

Народився В.Р. Рябов (1936-2002) – представник Патонівської школи, відомий вчений та експериментатор у галузі зварювання різномірних матеріалів. У його роботах були представлені принципи та методичні підходи до вивчення проблеми зварюваності металокомпозитів, досліджено процеси, що сприяють формуванню високоміцних сполук, що сприяло широкому впровадженню зазначених матеріалів у конструкціях авіаційної та ракетно-космічної промисловості.



02 березня 1927 року

Почалося будівництво туапсинської ділянки нафтопроводу Грозний–Туапсе. Це був перший великий радянський магістральний нафтопровід з труб середнього діаметра. Будівництво велося з 1927 до 1928 року. Для з'єднання труб на нафтопроводі вперше у світі було застосовано електродугове зварювання. Цей метод зварювання виявився дуже успішним і надалі знайшов широке застосування.



03 березня 1953 року

Було видано один з патентів компанії Castolin Eutectic, яка зробила вагомий внесок у розвиток зварювальних технологій. Підприємство було створено у 1906 р. Жан-П'єром Вассерманом у Лозанні, Швейцарія. Він відкрив спосіб паяння литого чавуну твердими припоями. Надалі були розроблені апарати для наплення, покриття, зварювання та власні витратні матеріали. Компанія присутня з власними відділеннями у понад 100 країнах та має високий міжнародний імідж.



04 березня 1918 року

Народився М.Г. Остапенко (1918-1965) – представник Патонівської школи. Він уперше для дугового зварювання вугільним електродом застосував вуглекислий газ як захисне середовище. Значний його внесок в обґрунтування розширення області застосування процесу стикового зварювання оплавленням на магістральних нафтопроводах за рахунок використання спеціальних трансформаторів та вирішення проблеми стикового зварювання обсадних труб при їх спуску в свердловину.



05 березня 1870 року

Народився Євген Оскарович Патон (1870-1953) – видатний учений у галузі мостобудування та електрозварювання, засновник широко відомої у світі Патонівської науково-інженерної школи. Герой Соціалістичної Праці, лауреат Сталінської премії, засновник Інституту електрозварювання, який з 1953 р. носить його ім'я. Діяльність Є.О. Патона у мостобудуванні, будівельній механіці, електрозварюванні та електрометалургії на завжди залишиться в історії світової науки та техніки.



06 березня 1906 року

Народився Девід Роланд Сміт (1906-1965) – американський художник, відомий своїми великими абстрактними геометричними скульптурами зі сталі, представник абстрактного імпресіонізму. Свою творчість виконував з металу. Перший досвід виготовлення металевих виробів отримав ще студентом у 1925 р., підробляючи зварником на заводі «Студебеккер». Під враженням від металевих робіт Пабло Пікассо (1881-1973) і Хуліо Гонсалеса (1876-1942) Девід Сміт створює в 1933 р. свою першу скульптуру з використанням зварювання.

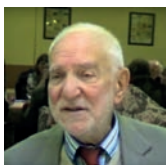


07 березня 2002 року

Опубліковано патент AU744847B2 на інноваційний процес зварювання Keyhole TIG. Цей процес був розроблений та запатентований Австралійською урядовою організацією з наукових та промислових досліджень (CSIRO). Суть цього процесу полягає у навмисному збільшенні дугового тиску, що призводить до розриву дна зварювальної ванни, утворюючи «замкову свердловину» для виходу дугового газу. Таким чином, утворюється міцна та спокійна зварювальна ванна. У результаті цей процес забезпечив автоматичне, високоякісне та глибоке зварювання. Компанія General Electric використовує цю технологію при виготовленні найбільших та найсучасніших газових турбін у світі.



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



08 березня 1924 року

Народився Ентоні Каро (1924-2013) – відомий британський скульптор. Для індивідуальної манери Каро, починаючи з 1960-х рр., ввів характерні абстрактні композиції, створювані за допомогою зварювання. Крім сталевих балок і труб, використовує у своїх творах форми, що нагадують або імітують «знайдені об'єкти».



09 березня 1943 року

Початок тесту танку модифікації М6 армії США. Ще 22 травня 1940 р. була сформульована первісна концепція нового важкого танку. У грудні 1941 р. перший екземпляр важкого 60-тонного танку було виготовлено на локомотивному заводі у Балдвіні. Корпус танку було зварено вручну. У 1944 р. тут перейшли на дугове автоматичне зварювання під флюсом. Зварювання бронекорпусів бойових машин виконували як на змінному, так і постійному струмах. Стикові з'єднання збирали з обробкою кромок та притупленням 2 мм, потім зварювали вручну за кілька проходів. Усього було вироблено лише 40 танків Т1/М6 різних модифікацій, які ніколи не брали участь у боях.



10 березня 1986 року

Помер Г.З. Волошкевич (1911-1986) – представник Патонівської школи. У 1957 р. Б.Є. Патон та Г.З. Волошкевич разом із співробітниками Новокаматорського машинобудівного заводу та заводу «Червоний котельник» (Таганрог) були удостоєні Ленінської премії за створення процесу електрошлакового зварювання та виробництва на його основі великогабаритних відповідальних виробів. Ця робота отримала в 1958 р. Великий приз на Всесвітній виставці у Брюсселі. Ряд фірм промислово розвинених країн придбали ліцензії на використання цього високопродуктивного способу зварювання.



11 березня 1818 року

Народився Анрі Сент-Клер Девіль (1818-1881) – французький хімік. Він у 1850 р. створив пальник, в якому водень та кисень змішувалися в спеціальній камері ще до виходу назовні (подібна схема використовується і в сучасних зварювальних пальниках). Поява змішувальної камери відкрила можливість регулювати склад та температуру газового полум'я, змінюючи співвідношення пального газу та окислювача.



12 березня 1683 року

Народився англійський дослідник природи, вчений Джон Теофіл Дезагюльє (1683-1744). У Королівському науковому товаристві він продемонстрував перший визначний приклад холодного зварювання тиском (без нагріву). Дві свинцеві кулі (перша з яких важила 1 фунт, а друга — 2 фунти), з яких були зрізані кульові сегменти, були спресовані руками з одночасним скручуванням. Виявилось, що в результаті вони з'єдналися. Кулі приєдналися одна до одної так міцно, що верхня однофунтова куля, яка підтримувалася рукою, від'єднувалася від нижньої лише при навантаженні понад 16 фунтів. При огляді дотичних поверхонь виявилось, що площа їх з'єднання не перевищувала площі кола діаметром 1/10 дюйма, хоча цю поверхню неможливо було точно виміряти внаслідок її неправильної форми.



13 березня 1903 року

Французький вчений Жозеф-Август Бушайє розробив конструкцію «дуплекс-електродів» (патент FR330200A від 13.03.1903 р.) для виконання одразу двох зварних точок. Верхній та нижній електродні вузли мали власні трансформатори. При паралельному підключенні обмоток трансформаторів виходить лише одна точка, при послідовному – відразу дві. Цей винахід суттєво підвищував продуктивність процесу точкового зварювання.



14 березня 1692 року

Народився Пітер ван Мушенбрук (1692-1761) – голландський фізик. До найвідоміших досягнень Мушенбрука належить створення лейденської банки – першого конденсатора, винайденого Мушенбруком та його учнем Кюнеусом в 1746 р. у Лейдені. Раніше і незалежно від Мушенбрука принцип конденсатора був відкритий померанським католицьким дяконом Евальдом фон Клейстом 11 жовтня 1745 р. Конденсатор широко використовується в сучасній зварювальній техніці, наприклад, при конденсаторному зварюванні.



15 березня 2002 року

Колективу вчених Інституту електрозварювання на чолі з Б.Є. Патоном було видано патент UA44805 «Спосіб з'єднання м'яких біологічних тканин та пристрій для його здійснення». Суть способу в тому, що кромки тканин зводять і затискають за допомогою електродів, крізь які проводять струм високої частоти. У процесі нагрівання тканин відбувається коагуляція (згортання) білка, за рахунок чого тканини з'єднуються – «зварюються». З використанням цього методу проведено десятки тисяч операцій. За винахід методу колектив авторів був відзначений Державною премією України в галузі науки та техніки (2004).

16 березня 1942 року

Перший пробний запуск ракети «Фау-2». Саме ракета «Фау-2» стала першим в історії штучним об'єктом, який здійснив суборбітальний космічний політ. Це згодом дало поштовх для створення та розвитку ракетобудування. Екземпляри ракети «Фау-2» робилися німцями наприкінці війни в умовах дефіциту стратегічної сировини. Тому при виробництві застосовувалася велика кількість дешевих заміників. З цієї причини ракети переважно були сталевими. Такий важливий вузол, як хвостова частина, виготовлявся зі сталевих листів за допомогою точкового зварювання.

**17 березня 1999 року**

17 березня 1999 р. почалося виробництво нового автомобіля на Запорізькому автомобілебудівному заводі, який отримав заводський індекс ЗАЗ-1103. Кузов ЗАЗ-1103 закритий, суцільнометалевий, несучого типу, так званий ліфтбек (псевдоседан): автомобіль має 5 дверей. Передній та задній бампери пластмасові, пофарбовані у колір кузова. Довжина «Славути» 3980 мм, ширина 1578 мм, висота 1425 мм; база (відстань між осями коліс) 2320 мм. Маса автомобіля у спорядженому стані становить 790–850 кг. Об'єм багажника становить 300 л у звичному режимі та 740 л при вантажному положенні заднього сидіння. Об'єм паливного бака 38 л. Запорізький автомобілебудівний завод припинив випуск моделі ЗАЗ-1103 Славути 11 лютого 2011 р. За весь період виробництва було випущено понад 141898 автомобілів, з них 130000 реалізовано в Україні.

**18 березня 1917 року**

Народився В.Є. Патон (1917-1987) – заслужений винахідник УРСР, талановитий інженер, блискучий конструктор. У 1948 р. розробив універсальний зварювальний автомат-трактор ТС-17, який не мав аналогів у вітчизняній та зарубіжній техніці. Він зробив значний внесок у створення спеціалізованих апаратів для зварювання та наплення в космосі, для проведення астрофізичних експериментів. В.Є. Патон лауреат трьох державних премій.

**19 березня 1935 року**

19 березня 1935 р. Ігор Сікорський (1889-1972), видатний авіаконструктор українського походження, отримав у США патент на «літальний апарат прямого підйому». Протягом 1908–1912 рр. Ігор Сікорський побудував у Києві 6 моделей літаків та 2 моделі вертольотів. У 1918 р. він емігрував до США, де в 1923 р. заснував компанію Sikorsky Aircraft. 14 вересня 1939 р. у США Ігор Сікорський підняв у повітря власний перший гелікоптер VS-300, придатний для практичних польотів.

**20 березня 1800 року**

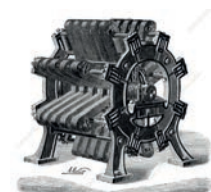
Італійський вчений Алессандро Вольта (1745-1827) інформує Королівське суспільство в Лондоні про створення джерела енергії, більш відомого як «Вольтов стовп». Вольта опустил у банку з кислотою дві пластинки — цинкову та мідну — і поєднав їх дротом. Після цього цинкова пластина почала розчинятися, а на мідній виділилися бульбашки газу. Вольта припустив і довів, що дротом протікає електричний струм. Так було винайдено «елемент Вольта» — перший гальванічний елемент.

**21 березня 1931 року**

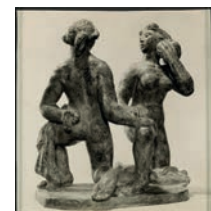
Вступив в дію корабель Le Chevalier Paul (Шевальє Поль) – перше французьке судно з цільнозвареним корпусом, водотоннажністю 2750 т. За порадою відомого німецького промисловця і винахідника Альфреда Круппа (1907-1967) для зварювання броньованих плит під час будівництва корабля почали використовувати електроди з сердечником з хромомолібденової сталі та покриттям, що було розроблене англійським хіміком А. Стромменгером.

**22 березня 1881 року**

Французький електротехнік Огюст де Мерітан отримав патент на технологію електродугового зварювання. Вона передбачала використання вугільного електрода для створення дуги, необхідної для здійснення зварювання. Ця технологія активно використовувалася під час роботи зі свинцевими пластинами для акумуляторних батарей. Мерітан розробив також спеціальне зварювальне обладнання, що включало закритий капюшон для зварника і газовідвідну трубу для того, щоб відводити небезпечні пари і окис свинцю, що утворюються під час проведення зварювальних робіт.

**23 березня 1942 року**

Народився Ебботт Лоуренс Паттісон (1916-1999) – американський абстрактний художник. Його скульптура «Жінки, що стоять на колінах» отримала в 1942 р. медаль в галузі мистецтв. Основними матеріалами, з яких виготовлялися скульптури, були сталь, бронза, латунь та мармур. Для створення своїх робіт майстер використовував автогенне зварювання. Він був одним із найвідоміших художників, які працювали в цьому напрямі.





24 березня 1988 року

Помер М.Г.-Г. Бельфор (1920 -1988), представник Патонівської школи. Він зробив значний внесок в створення основ проектування зварювального обладнання. Світове визнання набули його розробки автоматів для електрошлакового та дугового зварювання, що були класичними зразками сучасного зварювального обладнання.



25 березня 1958 року

Відбувся перший політ Avro Canada CF-105 Arrow – винищувача-перехоплювача з дельтоподібним крилом, що створювався канадською компанією Avro Aircraft Limited (Canada) у 1953–1959 рр. Конструкція літака була багато в чому передовою для свого часу. Для з'єднання деталей літака застосовувалося зварювання в інертних газах вольфрамовим електродом на обладнанні компанії Lincoln Electric. Внутрішньою структурою літака була просторова рама зі зварених труб.



26 березня 1945 року

Утворено польський Інститут зварювання у Глівіце. Він є найбільшим та найважливішим науково-дослідним центром в Польщі, який проводить роботи з дослідження, розвитку та впровадження зварювальних технологій. Важливим напрямом діяльності інституту є навчання та підготовка кадрів у галузі зварювання та неруйнівного контролю. Інститут видає зварювальний науково-технічний журнал «Biuletyn Spawalnictwa».



27 березня 1968 року

Шляхом злиття низки організацій був сформований Британський інститут зварювання (TWI). TWI працює для всіх галузей промисловості та для всіх аспектів виробництва. Установа також пропонує навчання та експертизу послуг з неруйнівного контролю, зварювання та інспекції в усьому світі. Одним із видатних досягнень інституту є створення способу зварювання тертям з перемішуванням.



American Welding Society

28 березня 1919 року

Засновано Американське товариство зі зварювання (AWS) – некомерційна організація, що займається проблемами стандартизації процесів зварювання, з'єднань деталей, паяння, різання, наплавлення та газотермічного наплення. В AWS працюють понад 73000 осіб та понад 1300 корпоративних членів по всьому світу, які об'єдналися з метою сприяння розвитку технології, теорії та практики зварювання.



29 березня 1853 року

Народився Еліу Томсон (1853-1937) – один із засновників індустрії електрики в США, видатний інженер, винахідник і першопрохідник, чий відкриття в області змінного струму призвели до відкриття ним електродвигуна змінного струму. Саме цей учений по праву вважається «батьком контактного зварювання», який зумів імплементувати його в промисловість. Під час своєї кар'єри, яка тривала п'ять десятиліть, ним отримано 696 патентів США на винаходи дугових ламп та генераторів, які стали основою для створення зварювальної техніки.



30 березня 1929 року

Ірвінг Ленгмюр (1881-1957) ввів термін «плазма» для позначення іонізованого газу в газорозрядній трубці. При вивченні електричного розряду в трубці з розрядженим повітрям була відкрита матерія, що стала четвертим станом речовини. Лауреат Нобелівської премії з хімії (1932) за дослідження в галузі хімії поверхневих явищ. У 1962 р. промисловою технологією плазмового різання здійснили вчені Інституту електрозварювання К.К. Хренов та Е.М. Есібян. Сьогодні ця технологія за популярністю перевершує решту методів різання.



31 березня 1948 року

З ініціативи академіка Є.О. Патона було засновано науково-технічний та виробничий журнал «Автоматичне зварювання» (перші два роки – збірка «Праці з автоматичного зварювання під флюсом»). За шириною охоплення та глибиною освітлення опублікованих матеріалів підшивки журналу за більше ніж 70 років його життя часто називають зварювальною енциклопедією. Він допоміг становленню кількох поколінь зварників.