

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 2 С В А Р Ю В А Н Н Я 2021

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

- Пашчин М.О., Шльонський П.С., Бризгалін А.Г., Кушнарєва О.С., Тодорович Н.Л. Особливості формування структури коаксіальних з'єднань міді та алюмінію при зварюванні вибухом з вакуумуванням зварювального проміжку..... 3
- Квасницький В.В., Матвієнко М.В., Мьяльніца Г.П., Квасницька Ю.Г., Бутурля Є.А. Розробка припою, технології паяння та виправлення поверхневих дефектів відливків жароміцних нікелевих сплавів суднових газових турбін 10
- Маринський Г.С., Лопаткіна К.Г., Чернець О.В., Подпрятков С.Є., Ткаченко В.А., Белоусов І.О., Васильченко В.А. Нові алгоритми високочастотного зварювання біологічних тканин 17
- Ниркова Л.І., Лабур Т.М., Осадчук С.О., Яворська М.Р., Коваль В.А. Вплив термообробки на властивості зварних з'єднань сплаву В1341 в умовах, що моделюють експлуатаційні 22
- Шлепаков В.М., Котельчук О.С. Розробка порошкових дрітків нового покоління для електродугового зварювання в середовищі захисного газу з'єднань низьколегованих сталей з межею міцності 640...940 МПа 32

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

- Нестеренков В.М., Кравчук Л.А., Русиник М.О. Вплив технологічних і металургійних факторів на формування зварних з'єднань міді при електронно-променевому зварюванні..... 38
- Косторной О.С., Лактіонов М.О., Холоша К.Ю. Наплавлення деталей розвантажувального пристрою відцентрових насосів 43
- Безушко О.М., Левченко О.Г., Майданчук Т.Б., Лук'яненко А.О., Гончарова О.М. Гігієнічні характеристики повітря робочої зони при дуговому зварюванні міді та її сплавів (Огляд)..... 47
- Недосєка С.А., Недосєка А.Я., Яременко М.А., Бойчук О.І., Овсієнко М.А. Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 1. Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію..... 52

ІНФОРМАЦІЯ

- Конференції, виставки, семінари – 2021 60

ЗВАРЮВАННЯ ЗА КОРДОНОМ

- Зварювальні матеріали для автомобільної промисловості..... 61

ПРАКТИКУМ ЗІ ЗВАРЮВАННЯ

- Основні види покриттів зварювальних електродів..... 63

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Pashchin M.O., Shlonsky P.S., Bryzgalin A.G., Kushnaryova O.S., Todorovych N.L. Features of formation of structure of coaxial joints of copper and aluminium in explosion welding with vacuuming of welding gap 3
- Kvasnytskyi V.V., Matviienko M.V., Mialnitsa H.P., Kvasnytska I.H., Buturlia Ye.A. Development of brazing alloy, brazing technologies and correction of castings surface defects of heat-resistant nickel alloys for ship gas turbines 10
- Marynsky G.S., Lopatkina K.G., Chemets O.V., Podpryatov S.E., Tkachenko V.A., Belousov I.O., Vasylychenko V.A. New algorithms of high-frequency welding of biological tissues..... 17
- Nyrkova L.I., Labur T.M., Osadchuk S.O., Yavorska M.R., Koval V.A. Influence of heat treatment on the properties of welded joints of V1341 alloy under modeled operating conditions 22
- Shlepakov V.M., Kotelchuk O.S. Development of new generation flux-cored wires for gas-shielded arc welding of joints of low-alloy steels with ultimate strength of 640...940 MPa..... 32

INDUSTRIAL

- Nesterenkov V.M., Kravchuk L.A., Rusynik M.O. Influence of technological and metallurgical factors on formation of copper welded joints in electron beam welding 38
- Kostornoj O.S., Laktionov M.O., Kholosha K.Y. Surfacing parts of unloading device of centrifugal pumps 43
- Bezushko O.M., Levchenko O.G., Maidanchuk T.B., Lukyanenko A.O., Goncharova O.M. Hygienic characteristics of air in the working zone during arc welding of copper and its alloys (Review) 47
- Nedoseka S.A., Nedoseka A.Ya., Yaremenko M.A., Boichuk O.I., Ovsienko M.A. Acoustic emission method at evaluation of the state of welds and their service properties Part 1. Effect of welded joint type on acoustic emission 52

INFORMATIONS

- Conferences, exhibitions, seminars – 2021..... 60

WELDING ABROAD

- Welding materials for the automotive industry..... 61

WELDING WORKSHOP

- The main types of coatings for welding electrodes..... 63



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
С.І. Кучук-Яценко (головний редактор),
В.М. Ліподаєв (штатний заст. гол. ред.)
О.М. Берднікова, Ю.С. Борисов,
В.В. Книш, В.М. Коржик, І.В. Кривцун,
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 2021

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:
S.I. Kuchuk-Yatsenko (Editor-in-Chief),
V.M. Lipodaev (Staff Deputy Editor-in-Chief)
O.M. Berdnikova, Yu.S. Borisov,
V.V. Knysh, V.M. Korzhyk, I.V. Krivtsun,
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 Kasymyr 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 2021

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.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ КОАКСІАЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ МІДІ ТА АЛЮМІНІЮ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВИБУХОМ З ВАКУУМУВАННЯМ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПРОМІЖКУ

М.О. Пашин, П.С. Шльонський, А.Г. Бризгалін, О.С. Кушнарєва, Н.Л. Тодорович

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

Викладено результати дослідження утворення інтерметалідів при зварюванні вибухом коаксіальних з'єднань міді і алюмінію в залежності від довжини з'єднання і середовища в зварювальному проміжку (повітрі і вакуумі). Проведений металографічний аналіз границі коаксіального з'єднання в мідно-алюмінієвих стрижнях показав, що на різних ділянках біметалевих стрижнів при зварюванні в різних режимах і в повітрі, і при наявності вакууму в зазорі, утворюються інтерметалідні прошарки різної товщини. Зростання, яке спостерігалось в об'ємній частці і товщині прошарку інтерметалідів в зоні з'єднання, по мірі віддалення від точки ініціювання, незалежно від середовища в зварювальному проміжку (повітря або вакуум), має закономірний характер і пояснюється канальним ефектом при зварюванні вибухом. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: зварювання вибухом, канальний ефект, інтерметаліди, швидкість точки контакту

Як відомо, в авіабудівній галузі виробники прагнуть до зниження маси літальних апаратів, тому виготовлення струмопровідних елементів із суцільним зазором з міді, що має високу електропровідність, але, при цьому, і високу щільність, недоцільне. У струмопровідних елементах (рис. 1) проходить змінний струм високої частоти і, з урахуванням скін-ефекту, струм розподіляється нерівномірно у перетині – переважно в тонкому поверхневому шарі [1].

Довгомірність плакування труби можна охарактеризувати коефіцієнтом довгомірності у вигляді співвідношення її довжини $L_{\text{тр}}$ до діаметру $d_{\text{тр}}$:

$$K_{\text{дл}} = L_{\text{тр}} \cdot d_{\text{тр}}^{-1}.$$

Серед причин, що викликають необхідність плакування довгомірних заготовок, можна виділити дві основні:

- отримання або відновлення стандартних виробів;
- підвищення продуктивності та економія дорогих матеріалів.

До теперішнього часу можливості технологій плакування вибухом труб і стрижнів обмежувалися короткомірними виробами ($K_{\text{дл}} < 5 \dots 10$) [2] і номенклатурою матеріалів нанесених покриттів (нержавіюча сталь, титан) [3–6]. У цих робо-

тах показана необхідність подальшого розвитку і вдосконалення технологій, зокрема, для освоєння діапазону $K_{\text{дл}} > 5 \dots 10$ і плакування електротехнічними матеріалами.

В роботі [7] представлена можливість отримання довгомірних коаксіальних з'єднань ($K_{\text{дл}} \sim 30$), але при цьому вказується, що суцільність з'єднання, в середньому, становить 50 % від загальної площі контакту поверхонь, які зварюються, що, можливо, є цілком прийнятним для електропровідності і не задовольняє, коли виріб піддається механічній дії (вигин, розплющення та ін.).

Незважаючи на численні успіхи, досягнуті в галузі вивчення процесу зварювання вибухом міді і алюмінію, завдяки дослідженням українських і зарубіжних вчених Кудинова В.М., Добрушина Л.Д., Петушкова В.Г., Дерибаса А.А., Седих В.С., Лисака В.І., Трикова Ю.П., Кузьміна С.В., Первухина Л.Б., Crossland B., Bahrani та ін. більшість робіт присвячено проблемі отримання листового біметалу або тришарового композитного матеріалу, отриманого за батареїною схемою (однчасне плакування з двох сторін).

Великий вплив на процес утворення з'єднань при зварюванні вибухом коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм має ударно-стиснений газ, що



Рис. 1. Вигляд струмопровідного елемента літаючих апаратів

Пашин М.О – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Шльонський П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3566-1752>, Бризгалін А.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-5886-3069>, Кушнарєва О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795>, Тодорович Н.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-3872-5790>

© М.О. Пашин, П.С. Шльонський, А.Г. Бризгалін, О.С. Кушнарєва, Н.Л. Тодорович, 2021

заповнює зазор між поверхнями, що зварюються, і рухається зі швидкістю, що перевищує швидкість точки контакту [8]. Для поєднання (сполучення) мідь–алюміній атмосфера в зварювальному зазорі впливає на формування структури з'єднання через низьку температуру плавлення алюмінію і евтектики Al_2Cu+k , яка має температуру плавлення $548^\circ C$ [9]. Висока температура газу перед точкою контакту призводить до нагрівання поверхонь, що зварюються [10–12]. Збільшення розмірів вихрових зон (аж до розплавів і руйнування плакуючого шару) з віддаленням від початку процесу зварювання свідчить про підвищення кількості енергії, що поглинається металом в зоні утворення зварного з'єднання. Наведені вище результати досліджень дозволили сформулювати мету цієї роботи.

Метою даної роботи було дослідження впливу довжини та вакуумування зварювального зазору на структуру з'єднання міді з алюмінієм при зварюванні вибухом довгомірних циліндричних виробів.

Матеріали і методики досліджень. Для визначення максимальної довжини, на якій можливе отримання якісного зварного коаксіального з'єднання міді і алюмінію, а також впливу вакуумування, були проведені експерименти зі зварювання вибухом на режимах, зазначених у таблиці, з вакуумуванням і без вакуумування зварювального зазору.

В якості зварюваних матеріалів використовувалися трубка з міді марки М1 з зовнішнім діаметром 28 мм і товщиною стінки 1 мм і стрижня з алюмінію марки АД1 (рис. 2), ділянка, що зварювалася, проточувалася до діаметра 24 мм. Довжина заготовок, що зварювалися, становила 1000 мм. Зварювання вибухом проводилося на двох режи-

мах, при швидкостях зіткнення 320 та 390 м/с, швидкість точки контакту 2000 і 2600 м/с відповідно, з вакуумуванням зварювального зазору і без. Перед зварюванням мідні трубки травили в 10%-му розчині азотної кислоти для зняття окалини після відпалу, а алюмінієві стрижні зачищали наждачним папером з величиною зерна Р120. При вакуумуванні зварювального зазору величина вакууму складала 20 кПа. Для рівномірності засипки використовували контейнер, який складається з декількох частин (рис. 2, б).

Вирізання зразків для подальшого виготовлення з них шліфів проводилося механічним способом за допомогою кутової пилки, за схемою, що представлена на рис. 3. У всіх випадках вирізання проводилося з використанням охолоджувальної рідини для запобігання перегріву зони з'єднання.

У таблиці наведено опис місця вирізання зразка для вивчення мікроструктури і вказано режим, на якому здійснювалося зварювання вибухом.

Зразок мікрошліфа мідно-алюмінієвих з'єднань після зварювання вибухом показано на рис. 4. Для виявлення мікроструктури виконувалося травлення по міді. Травлення мікрошліфів виконували в суміші з 1 частини азотної кислоти (50 %) і 1 частини води (50 %).

Випробування на твердість проводили методом Віккерса. В поверхню матеріалу вдавлюється чотиригранна алмазна пірамідка з кутом при вершині $\alpha = 136^\circ$.

Вимірювання мікротвердості здійснювали на мікротвердомірі ПМТ-3. Вимірювання проводили методом відновленого відбитка, який полягає в нанесенні на випробувану поверхню відбитка після прикладання до алмазного наконечника статич-



Рис. 2. Заготовки під зварювання вибухом (а), засипка ВВ в складений контейнер (б)

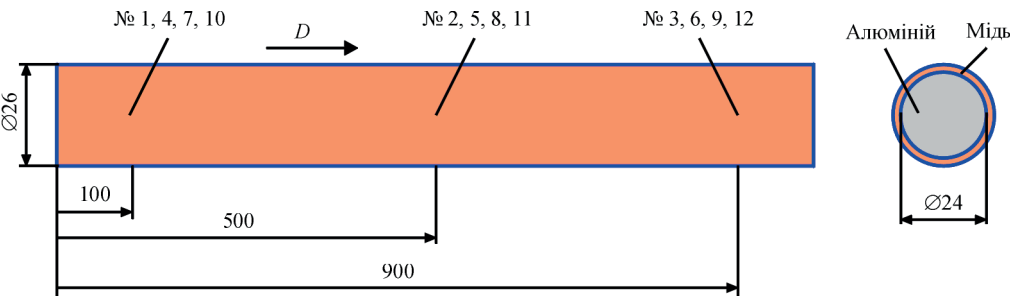


Рис. 3. Схема вирізання шліфів з біметалічного стрижня

Номера шліфів, вирізаних зі стрижнів, які зварені на різних режимах

Режим	$V_k = 2000, \text{ м/с}$	$V_k = 2600, \text{ м/с}$
Повітря	№ 1 – початок 70...100 мм	№ 7 – початок 70...100 мм
«-»	№ 2 – середина 450...500 мм	№ 8 – середина 450...500 мм
«-»	№ 3 – кінець 870...900 мм	№ 9 – кінець 870...900 мм
Вакуум	№ 4 – початок 70...100 мм	№ 10 – початок 70...100 мм
«-»	№ 5 – середина 470...500 мм	№ 11 – середина 470...500 мм
«-»	№ 6 – кінець 870...900 мм	№ 12 – кінець 870...900 мм

ного навантаження 0,1Н для міді М1 і алюмінію АД1. Крок вимірювання встановлювали в межах від 0,05 до 0,2 мм в залежності від твердості матеріалу і відстані від границі з’єднання d (зі збільшенням d крок збільшувався). Налаштування при-

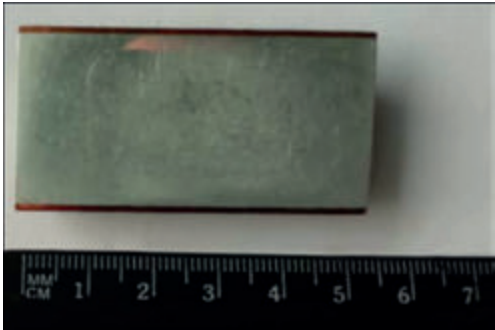


Рис. 4. Зразок мікрошліфа біметалічного стрижня для металографічних досліджень після зварювання вибухом

ладу ПМТ-3 на дотик зразка, що досліджувався, здійснювали при навантаженні $P = 0,005 \text{ Н}$.

Результати експериментів та їх обговорення. Отримані зразки піддавалися металографічним дослідженням, результати яких представлені на рис. 5. Були вивчені об’ємна частка інтерметалідів

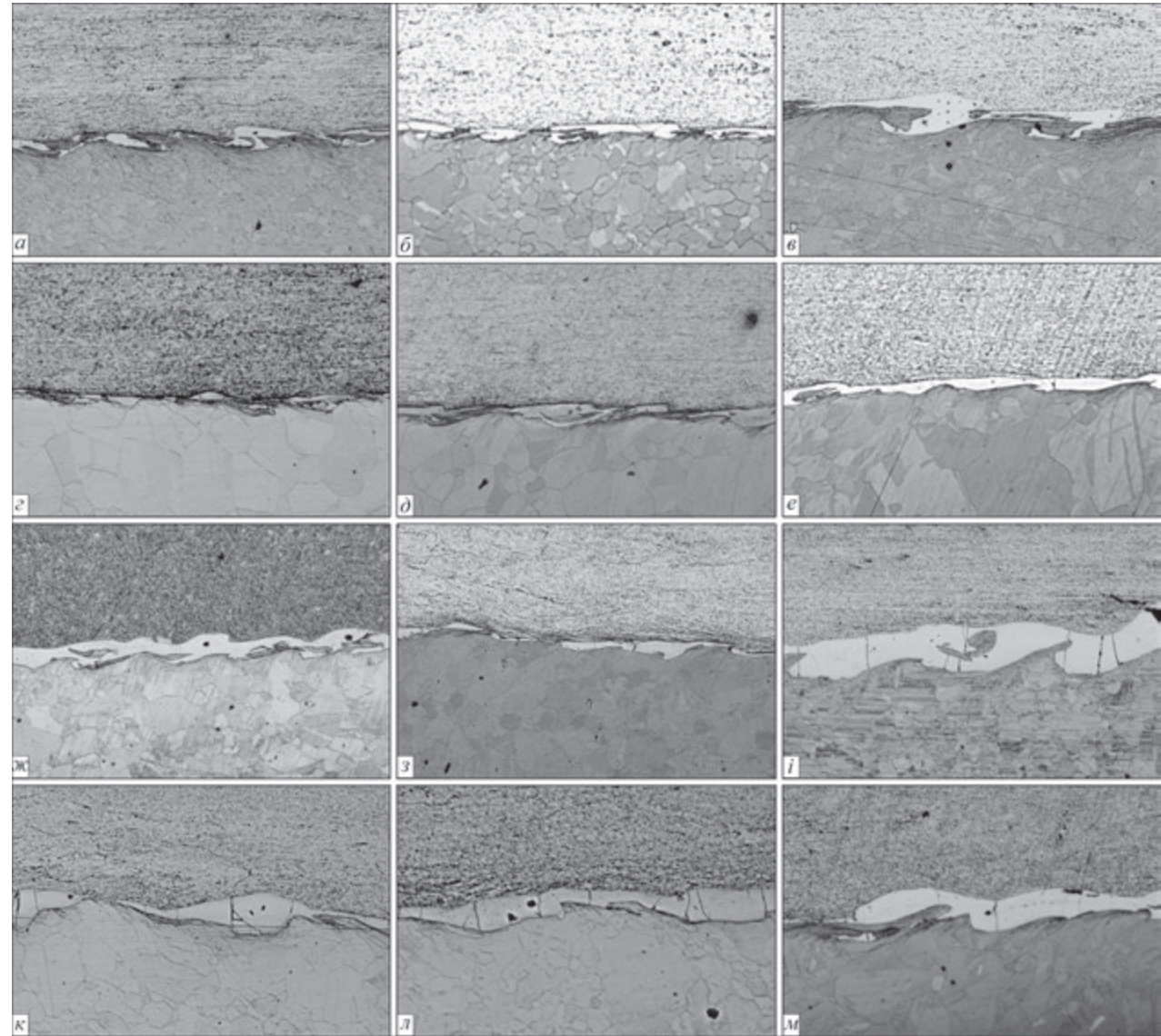


Рис. 5. Зміна мікроструктури зони з’єднання в залежності від відстані від початку зварювання і середовища в зварювальному зазорі при різних швидкостях точки контакту ($\times 150$, алюміній вгорі): $a, б, в$ – початок, середина, кінець, $V_k = 2000 \text{ м/с}$ в повітрі; $г, д, е$ – початок, середина, кінець, $V_k = 2000 \text{ м/с}$ у вакуумі; $ж, з, і$ – початок, середина, кінець, $V_k = 2600 \text{ м/с}$ в повітрі; $к, л, м$ – початок, середина, кінець, $V_k = 2600 \text{ м/с}$ у вакуумі

і ширина інтерметалідного шару, за результатами яких були побудовані графіки залежності вищевказаних параметрів від режиму зварювання вибухом і наявності або відсутності вакууму в зварювальному зазорі (рис. 6, 7).

На рис. 5, а, б, в представлені фото мікроструктури різних зон (початок, середина, кінець) біметалічного стрижня, отриманого при $V_k = 2000$ м/с в повітрі, а на рис. 5, г, д, е вакуумі. Фото мікроструктури різних зон біметалічного стрижня (початок, середина, кінець), що отриманий в повітрі і вакуумі при $V_k = 2600$ м/с, представлені на рис. 5 (ж, з, і) та рис. 5 (к, л, м) відповідно.

Проведений металографічний аналіз границі коаксіального з'єднання в мідно-алюмінієвих стрижнях показав, що на різних ділянках біметалевих стрижнів при зварюванні на різних режимах і в повітрі, і при наявності вакууму в зазорі, неможливо отримати з'єднання без утворення інтерметалідів.

При зварюванні вибухом міді з алюмінієм на швидкості точки контакту $V_k = 2000$ м/с лінія з'єднання має конфігурацію, близьку до хвилюподібної, з наявністю ділянок оплавленого металу біля основи бугрів деформації. Інтенсифікація режимів зварювання (збільшення швидкості точки контакту до 2600 м/с) призводить до формування хвилюватої конфігурації з'єднання з нестабільними параметрами хвиль і утворення суцільного прошарку з інтерметалідів як у вакуумі, так і без нього.

При цьому утворюється завихрення на початку утворення хвилі, всередині якої спостерігають рихлості, частки міді та інші включення (див. рис. 5).

Зростання об'ємної частки, яке спостерігалось (рис. 6) і товщини прошарку (рис. 7) інтерметалідів в зоні з'єднання по мірі віддалення від точки ініціювання, незалежно від середовища в зварювальному зазорі (повітря або вакуум), носить закономірний характер і пояснюється каналним ефектом при зварюванні вибухом [13].

При зварюванні в повітрі на режимі $V_k = 2000$ м/с на початку зразка об'ємна частка ін-

терметалідів дорівнює 60 %, при зварюванні у вакуумі, у тому ж режимі – вона дорівнює 48 % (рис. 6), що в 1,25 рази менше. При цьому співвідношення об'ємної частки інтерметалідів в повітрі до цієї ж частки в вакуумі на початку зразка при зварюванні на режимі $V_k = 2600$ м/с становить 1,08. Це свідчить про те, що при збільшенні швидкості точки контакту перехід кінетичної енергії в теплову переважно відбувається за рахунок пластичної деформації металу навколошовної зони, і в меншій мірі за рахунок каналного ефекту, який слабо виражений на малій відстані від початку ініціювання процесу зварювання вибухом.

В середині і наприкінці зразка співвідношення об'ємної частки інтерметалідів в повітрі до цієї ж частки у вакуумі при зварюванні на режимі $V_k = 2000$ м/с становить 1,05 і 1,03 відповідно, тобто вони практично вирівнюються. Це свідчить про те, що на відстані більше десяти діаметрів заготовки в зварювальному зазорі при зварюванні з вакуумуванням накопичується повітряна «пробка» з ударно-стисненого повітря і частинок матеріалів, що зварюються, яка розігріває зварювані поверхні.

Як видно з рис. 6 співвідношення об'ємної частки інтерметалідів в повітрі до цієї ж частки у вакуумі в середині зразка при зварюванні на режимі $V_k = 2600$ м/с, дорівнює 0,61. Таким чином об'ємна частка інтерметалідів, отриманих при зварюванні у вакуумі, більше в 1,5 рази, ніж при зварюванні в повітрі. Це пояснюється тим, що при зварюванні у цьому режимі на відстані 250 мм від початку процесу відбувається розрив плакованого шару (рис. 8), результатом якого є витікання розігрітого ударно-стисненого повітря. При цьому на заготовці, яка отримана з вакуумуванням зварюваного зазору, початок дефектів у вигляді розриву плакованого шару спостерігається на відстані близько 500 мм від ближчого до точки ініціювання краю заготовки.

Подібним чином виглядає і залежність ширини інтерметалідного прошарку від режиму і відстані від початку зварювання (рис. 7). Можна бачити, що на початковій ділянці зразка ширина інтерме-

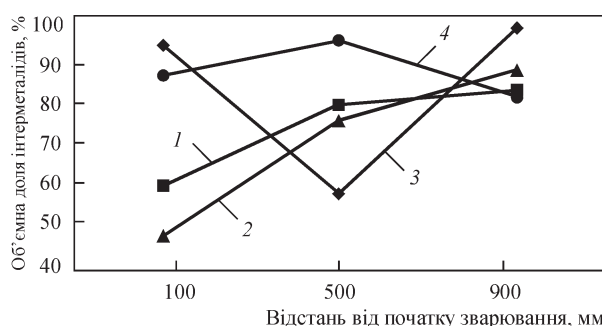


Рис. 6. Залежність об'ємної частки інтерметалідів від режиму й відстані від початку зварювання: 1 – $V_k = 2000$ м/с – у повітрі; 2 – $V_k = 2000$ м/с – у вакуумі; 3 – $V_k = 2600$ м/с – у повітрі; 4 – $V_k = 2600$ м/с – у вакуумі

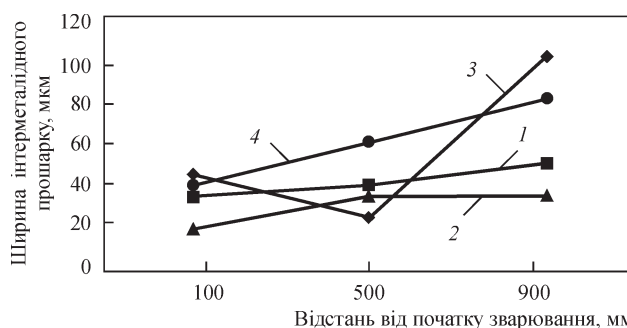


Рис. 7. Залежність ширини інтерметалідного прошарку від режиму і відстані від початку зварювання: 1 – $V_k = 2000$ м/с – у повітрі; 2 – $V_k = 2000$ м/с – у вакуумі; 3 – $V_k = 2600$ м/с – у повітрі; 4 – $V_k = 2600$ м/с – у вакуумі



Рис. 8. Коаксіальна заготовка після зварювання вибухом. Загальний вигляд, зверху – з вакуумом, знизу – без вакууму, напрямки детонації зліва направо. Вигляд А – розрив плакованого шару, зверху – з вакуумом, знизу – без вакууму

талідного прошарку при зварюванні в повітрі на режимі $V_k = 2000$ м/с становить 35 мкм, що істотно більше (в 1,75 рази), ніж при зварюванні у вакуумі 20 мкм. При цьому ширина інтерметалідного прошарку при зварюванні в повітрі на режимі $V_k = 2600$ м/с становить 45 мкм, що можна порівняти зі зварюванням у вакуумі – 40 мкм. Це свідчить про те, що на початковому етапі зварювання основним механізмом переходу механічної енергії в теплову є пластична деформація металу навколошовної зони.

На середній ділянці заготовки при зварюванні на режимі $V_k = 2000$ м/с ширина інтерметалідного прошарку збільшується щодо початкової ділянки при зварюванні як у вакуумі, так і в повітрі. При цьому знижується співвідношення ширини інтерметалідного прошарку, отриманого в повітрі, до ширини, отриманого в вакуумі, до 1,14 рази. В кінці заготовки при зварюванні в повітрі на режимі $V_k = 2000$ м/с спостерігається зростання ширини інтерметалідного прошарку в 1,25 рази в порівнянні з середньою ділянкою, а при зварюванні у вакуумі зростання ширини не спостерігається.

Таким чином, вакуумування зварювального зазору при зварюванні вибухом довгомірних коаксіальних з'єднань дозволяє знижувати ширину і об'ємну частину інтерметалідного прошарку, але не виключає утворення інтерметалідів.

Менша кількість інтерметалідів при зварюванні у вакуумі свідчить про те, що основний енергетичний внесок в створення інтерметалідів дає каналний ефект, який особливо виявляється при зварюванні вибухом коаксіальних з'єднань.

Дослідження мікротвердості зони зварного з'єднання коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок (рис. 9), які отримані при зварюванні вибухом у вакуумі і без нього на різних режимах ($V_k = 2000$

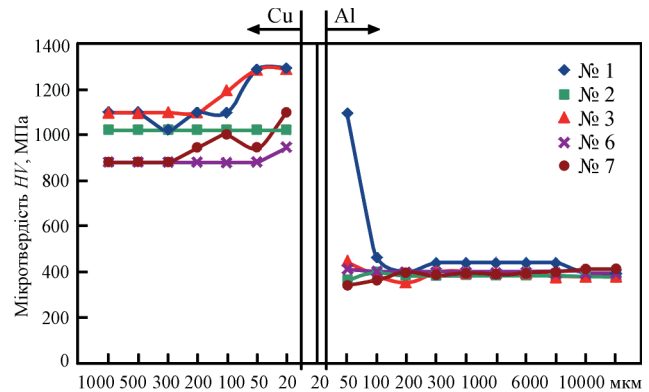


Рис. 9. Зміна мікротвердості в зварному з'єднанні в залежності від режиму зварювання і наявності повітря в зазорі (номери зразків відповідають рис. 2)

та $V_k = 2600$ м/с) показали, що в зоні з'єднання спостерігається типовий для зварювання вибухом характер розподілу мікротвердості зі значеннями 946...1100 МПа, що на 10..15 % перевищує значення 860...940 МПа для плоского біметалу мідь–алюміній [14].

Спостерігається зміцнення приконттактних шарів, мікротвердість міді при зварюванні вибухом на режимі $V_k = 2000$ м·с⁻¹ у вакуумі становить 1190 МПа, що вище, ніж мікротвердість приконттактних шарів при зварюванні у такому ж режимі у повітрі на 150 МПа (зразки №6 і №3 відповідно). Зона максимальної мікротвердості міді (946...1100 МПа) досягає 0,05...0,15 мм. Це також є підтвердженням того, що швидкість зіткнення при зварюванні у вакуумі перевищує швидкість зіткнення при зварюванні в повітрі.

Мікротвердість алюмінію в приконттактній зоні знаходиться в діапазоні 336...413 МПа, що на 5...12 % нижче, ніж максимальна мікротвердість алюмінію (400...460 МПа) для біметалу мідь–алюміній, отриманого за плоскою схемою

[14], при цьому в приконтактній зоні на глибині 0,02...0,05 мм мікротвердість має нижче значення, ніж на більшій глибині. Ймовірно, це пов'язано з тим, що при зварюванні вибухом за коаксіальною схемою відбувається більш інтенсивний нагрів поверхневого шару в порівнянні з паралельною схемою і тонкий шар алюмінію, що має низьку температуру плавлення, частково відпалюється і стає м'якшим.

Висновки

1. Експериментально встановлено, що при зварюванні вибухом міді з алюмінієм за коаксіальною схемою з вакуумування зварювального зазору можливо отримати заготовку без дефектів плакування довжиною до 500 мм з діаметром 26 мм, а при зварюванні без вакуумування зварювального зазору тільки до 200...250 мм при тому ж діаметрі.

2. На підставі металографічних досліджень встановлено, що вакуумування зварювального зазору дозволяє знизити ширину інтерметалідного прошарку майже в 1,4 в середньому по довжині на режимі $V_k = 2000$ м/с і в 1,2 рази на режимі $V_k = 2600$ м/с, і знизити об'ємну частку інтерметалідів в 1,1 рази і в 1,15 рази при зварюванні на вказаних вище режимах відповідно. Це пояснюється тим, що основний енергетичний внесок в створення інтерметалідів дає каналний ефект.

3. Встановлено, що створення вакууму (~ 20 кПа) в зазорі при зварюванні вибухом міді з алюмінієм, які зібрані коаксіально, знижує кількість інтерметалідів, які виникають після зварювання на 20 %.

Список літератури

1. Брызгалін А. Г., Добрушин Л. Д., Шлєнський П. С. и др. (2015) Изготовление коаксиальных медно-алюминиевых прутков с помощью сварки взрывом и протяжки. *Автоматическая сварка*, **3-4**, 72–76.
2. Мелихов В.П. (1979) О длине устойчивости сварки взрывом эксцентрично расположенных цилиндров. *Сварка и резка взрывом*. Кудин В.М. (ред.). Киев, Изд-во ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 25–28.
3. Цемахович Б.Д. (1987) Перспективы сварки взрывом в атомном машиностроении. *VII Всесоюз. совещ. по сварке и резке взрывом, г. Киев, 29–30 сент. 1987 г.: Сб. тез. докл.* Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 60–66.
4. Ковалевский В.Н., Алексеев Ю.Г., Сагарда Е.В. (1985) Плакирование толстостенных труб энергией взрыва. *Применение энергии взрыва в сварочной технике*. Кудин В.М. (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 103–108.
5. Ковалевский В.Н., Алексеев Ю.Г., Сенченко Г.М. и др. (2001) К вопросу о теории процесса сварки труб взрывом. *Сварка и родственные технологии*. Минск, Республ. межвед. сб., сс. 37–39.
6. Атрошенко Э.С., Розен А.Е., Лось И.С. и др. (2000) Расчет параметров сварки взрывом при метании цилиндрической оболочки. *Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр.* Лысак В.И. (ред.). Волгоград, ВолгГТУ, сс. 24–30.
7. Малахов А.Ю. (2019) Плакирование взрывом длинномерных цилиндрических изделий функциональными покрытиями. Авт. реф. дис. ... канд. техн. наук. Черноголовка.

8. Дерибас А.А., Захаренко И.Д. (1974) О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин. *Физ. горения и взрыва*, **10**, **3**, 409–423.
9. Хансин М., Андерго К. (1962) *Структуры двойных сплавов*. Новикова И.И., Рольберг И.Л. (ред.). Пер. с англ. Москва, Металлургия, Т. 1.
10. Ишуткин С.Н., Кирко В.И., Симонов В.А. (1980) Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин. *Физика горения и взрыва*, **6**, 69–73.
11. Бердыченко А.А., Злобин Б.С., Первухин Л.Б., Штерцер А.А. (2003) О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом. *Там же*, **2**, 128–136.
12. Первухин Л.Б., Первухина О.Л., Денисов И.В. и др. (2016) К вопросу о предельных размерах листов, получаемых сваркой взрывом. *Известия ВолгГТУ*, **10**, 76–86.
13. Добрушин Л.Д., Фадеев Ю.И., Илларионов С.Ю., Шлєнський П.С. (2009) Канальный эффект при сварке взрывом. *Автоматическая сварка*, **11**, 19–21.
14. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгул В. (2004) *Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов*. Москва, Металлургиздат.

References

1. Bryzgalin, A.G., Dobrushin, L.D., Shlensky, P.S. et al. (2015) Manufacture of coaxial copper-aluminium rods using explosion welding and drawing. *The Paton Welding J.*, **3/4**, 69-73.
2. Melikhov, V.P. (1979) About length of explosion welding stability of eccentrically located cylinders. In: *Explosion welding and cutting*. Ed. by V.M. Kudinov. Kiev, PWI, 25–28 [in Russian].
3. Tsemakhovich, B.D. (1987) Prospects of explosion welding in nuclear machine-building. In: *Proc. of 7th All-Union Meeting on Explosion Welding and Cutting* (Kiev, 29-30 September, 1987), Kiev, PWI, 60-66 [in Russian].
4. Kovalevsky, V.N., Alekseev, Yu.G., Sagarda, E.V. (1985) Cladding of thick-wall pipes by explosion energy. In: *Application of explosion energy in welding engineering*. Ed. by V.M. Kudinov. Kiev, PWI, 103-108 [in Russian].
5. Kovalevsky, V.N., Alekseev, Yu.G., Senchenko, G.M. et al. (2001) To the problem of theory of explosion welding of pipes. In: *Welding and related technologies*. Minsk, Pepubl. Interdept. Transact., 37-39 [in Russian].
6. Atroshchenko, E.S., Rozen, A.E., Los, I.S. et al. (2000) Calculation of explosion welding parameters in throwing a cylindrical shell. In: *Explosion welding and properties of welded joints: Interuniv. Transact.* Ed. by V.I. Lysak, Volgograd, VolgGTU, 24-30 [in Russian].
7. Malakhov, A.Yu. (2019) Explosion cladding of long-length cylindrical products by functional coatings. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree*. Chernogolovka [in Russian].
8. Deribas, A.A., Zakharenko, I.D. (1974) On surface effects in oblique collisions of metallic plates. *Fiz. Goreniya i Vzryva*, **10**(3), 409–423 [in Russian].
9. Khansin, M., Andergo, K. (1962) *Structures of binary alloys*. Ed. by I.I. Novikova, I.L. Rolberg. Vol. 1. Moscow, Metallurgy [in Russian].
10. Ishutkin, S.N., Kirko, V.I., Simonov, V.A. (1980) Study of thermal action of shock-compressed gas on surface of colliding plates. *Fiz. Goreniya i Vzryva*, **6**, 69–73 [in Russian].
11. Berdychenko, A.A., Zlobin, B.S., Pervukhin, L.B., Shtertser, A.A. (2003) On possible inflammation of particles ejected into the gap in explosion welding of titanium. *Ibid.*, **2**, 128–136 [in Russian].
12. Pervukhin, L.B., Pervukhina, O.L., Denisov, I.V. et al. (2016) To problem about limit of size of sheets produced by explosion welding. *Izvestiya VolgGTU*, **10**, 76-86 [in Russian].
13. Dobrushin, L.D., Fadeenko, Yu.I., Illarionov, S.Yu., Shlensky, P.S. (2009) Channel effect in explosion welding, **11**, 16-17 [in Russian].
14. Trykov, Yu.P., Gurevich, L.M., Shmorgun, V. (2004) *Layered composites based on aluminium and its alloys*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].

FEATURES OF FORMATION OF STRUCTURE OF COAXIAL JOINTS OF COPPER AND ALUMINIUM IN EXPLOSION WELDING WITH VACUUMING OF WELDING GAP

M.O. Pashchin, P.S. Shlonsky, A.G. Bryzgalin, O.S. Kushnaryova, N.L. Todorovych

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

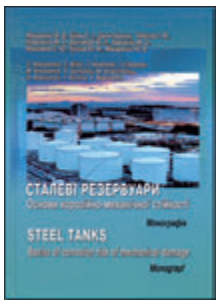
The results of the study of intermetallics formation in explosion welding of coaxial joints of copper and aluminium depending on the length of the joint and the environment in the welding gap (air and vacuum) are presented. The metallographic analysis of the boundary of the coaxial joint in copper-aluminium rods showed that at different areas of bimetallic rods in welding under different conditions both in air as well as in the presence of vacuum in the gap, intermetallic layers of different thickness are formed. The growth, observed in the volume fraction and thickness of the intermetallic layer in the joint area, as it moves away from the initiation point, regardless of the environment in the welding gap (air or vacuum), is natural and is explained by the channel effect in explosion welding. 14 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Key words: explosion welding, channel effect, intermetallics, contact point speed

Надійшла до редакції 22.01.2021

Нові книги

Макаренко В.Д., Білик С.І., Джон Ньюхук, Чеботар І.М., Коваленко М.А., Винников Ю.Л., Харченко М.О., Максимов С.Ю., Кусков Ю.М., Макаренко Ю.В. **Сталеві резервуари. Основи корозійно-механічної стійкості.** Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, – 2020 – 523 с.



Приведені відомості про основні причини, чинники і умови корозійно-механічних ушкоджень і руйнувань сталевих вертикальних резервуарів та обґрунтовані основні аспекти водневої деградації резервуарних сталей тривалого терміну експлуатації при змінних навантаженнях і дії хімічно-агресивних середовищ. Розглянуті особливості експлуатації резервуарів для тривалого зберігання нафти і нафтопродуктів. Систематизовані і узагальнені результати досліджень впливу умов, факторів і технологічних особливостей робочих середовищ на корозійно-механічну тріщиностійкість резервуарних сталей, які тривалий час експлуатуються в агресивних зонах нафтових родовищ. Запропонована науково-системна технологічна методологія подовження експлуатаційного ресурсу резервуарних конструкцій, яка дозволяє суттєво збільшити безаварійний і безвідмовний термін їх експлуатації. В роботі вперше застосований нейромережевий метод аналізу і прогнозування залишкового ресурсу сталевих резервуарів.

Монографія призначена для спеціалістів нафтогазової промисловості, може бути корисною для аспірантів і студентів машинобудівельних напрямів та нафтогазових спеціальностей ВНЗ.

Макаренко В.Д., Максимов С.Ю., Винников Ю.Л. **Морські бурові платформи. Т.1.** Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, – 2020 – 420 с.



Приведені відомості про основні причини, чинники і умови корозійно-механічних ушкоджень і руйнувань сталевих трубних конструкцій морських бурових платформ та обґрунтовані основні аспекти локальної мікробіологічної корозії та водневої деградації конструктивних сталей морських платформ тривалого терміну експлуатації при змінних навантаженнях і дії хімічно-агресивних середовищ, в тому числі морської води. Систематизовані і узагальнені результати досліджень впливу умов, факторів і технологічних особливостей робочих середовищ на корозійно-механічну тріщиностійкість сталей конструктивних елементів морських бурових платформ, які тривалий час експлуатуються в агресивних зонах нафтових родовищ морських шельфів. Запропонована науково-системна технологічна методологія подовження експлуатаційного ресурсу морських сталевих конструкцій, яка дозволяє суттєво збільшити безаварійний і безвідмовний термін їх експлуатації. В роботі вперше застосований нейромережевий метод аналізу

і прогнозування залишкового ресурсу сталевих конструкцій морських бурових платформ. Монографія призначена для спеціалістів нафтогазової промисловості, може бути корисною для аспірантів і студентів машинобудівельних напрямів та нафтогазових спеціальностей ВНЗ.

Макаренко А.Д., Чигарьов В.В., Максимов С.Ю. **Морські бурові платформи. Т.2.** Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, – 2020 – 424 с.



Приведені відомості про основні причини, чинники і умови корозійно-механічних ушкоджень і руйнувань сталевих трубних конструкцій морських бурових платформ та обґрунтовані основні технологічні операції підводної частини будівництва та ремонту джекетів — трубчастих сталевих конструкцій опор основ і фундаментів морських бурових платформ. Систематизовані і узагальнені результати досліджень впливу умов, факторів і технологічних особливостей робочих середовищ на корозійно-механічну тріщиностійкість сталей конструктивних елементів морських бурових платформ, які тривалий час експлуатуються в агресивних зонах нафтових родовищ морських шельфів. Запропонована науково-системна технологічна модель подовження експлуатаційного ресурсу морських сталевих конструкцій, яка дозволяє суттєво збільшити безаварійний і безвідмовний термін їх експлуатації. Монографія призначена для спеціалістів

нафтогазової промисловості, може бути корисною для аспірантів і студентів машинобудівельних напрямів та нафтогазових спеціальностей ВНЗ.

РОЗРОБКА ПРИПОЮ, ТЕХНОЛОГІЇ ПАЯННЯ ТА ВИПРАВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ ВІДЛИВОК ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ СУДНОВИХ ГАЗОВИХ ТУРБІН

В.В. Квасницький¹, М.В. Матвієнко², Г.П. Мяльниця³, Ю.Г. Квасницька⁴, Є.А. Бутурля⁵

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 73000, м. Херсон, вул. Ушакова, 44

³ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект». 54000, м. Миколаїв, Богоявленський просп. 42А

⁴Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України. 03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34

⁵Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 54000, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9

Метою роботи було розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ, що використовуються при виробництві суднових газових турбін нового покоління. Обов'язковою умовою було забезпечення високотемпературної міцності спаяних з'єднань не нижче за 80 % від міцності основного металу. При розробці припою використана двоступенна методика, де на першому (розрахунковому) етапі визначено необхідні концентрації легуючих елементів в основі припою, невідповідність параметрів будови γ - і γ' -фаз, критичні температури, кількість електронних вакансій, фізико-механічні властивості сплавів. На другому (експериментальному) етапі визначено раціональний вміст кількості елементів депресантів. В якості депресанту обрано бор. Встановлено, що при використанні припою, що містить 1,0...1,2 мас. % бору, структурна будова основного металу і шва є ідентичними. Після паяння і термічної обробки боридних евтектик у спаяних з'єднаннях не виявлено. Встановлено, що в визначених межах бор не зменшує стійкість спаяних з'єднань до високотемпературної сольової корозії. Досліджено поверхневі властивості припою і його взаємодію зі сплавами СМ93-ВІ і СМ96-ВІ. Розроблений припій SBM-4 показав високі технологічні властивості й дозволяє підвищити температуру робочого газу у газових турбінах. Розроблена технологія паяння сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ забезпечила межу міцності σ_b на рівні основного металу. Довготривала міцність спаяних з'єднань при температурі 900 °С дорівнювала 314...321 МПа на базі 100 год, що становить 0,89...0,91 довготривалої міцності полікристалічних сплавів. Розроблено технологію виправлення дефектів лопаток припоєм SBM-4. Бібліогр. 12, рис. 4.

Ключові слова: припій, жароміцні нікелеві сплави, технологія паяння, виправлення дефектів лиття, елементи депресанти, бор, газові турбіни, лопатка

Суднові та авіаційні газові турбіни працюють на різному паливі, тому хімічний склад жароміцних сплавів для суднових і авіаційних газових турбін (ГТ) відрізняються, а робочі температури авіаційних турбін досягають 1220 °С [1]. Загальносвітові тенденції розвитку машинобудування свідчать про поширення застосування зварювання та споріднених процесів для виготовлення конструкцій різноманітного призначення [2]. Основним способом з'єднання жароміцних нікелевих сплавів є паяння [3]. Зварювання плавленням робочих лопаток ГТ не дає позитивних результатів через утворення гарячих тріщин як при зварюванні, так і при термічній обробці, призводить до знеміцнення та руйнування спрямованозакристалізованої і монокристалічної структур [4].

Лопатки суднових ГТ виготовляють методом точного лиття у вакуумі кожен окремо. Це дозволяє за наявності поверхневих дефектів їх виправити паянням. За допомогою паяння закрива-

ють також знакові отвори охолоджуваних лопаток для закріплення внутрішніх стрижнів. Враховуючи те, що сутність паяння полягає в зменшенні температури плавлення припою шляхом використання депресантів, важливою проблемою паяння є підвищення рівня міцності спаяних з'єднань до рівня, близького до міцності основного металу. Необхідно також забезпечити стійкість спаяних з'єднань проти високотемпературної сольової корозії (ВСК) в умовах роботи морських газових турбін. Найбільш теплонавантаженими в ГТ є соплові і робочі лопатки. Враховуючи складні умови роботи суднових ГТ, спроектовані турбіни нового покоління, розроблені нові жароміцні нікелеві сплави (ЖНС) СМ93-ВІ і СМ96-ВІ [5], які дозволяють підняти робочу температуру газу на 40...60 °С. Для паяння нових ЖНС необхідне створення нових припоїв з більш високими температурами плавлення та паяння, що забезпечують формування з'єднань з підвищеними жаростійкі-

Квасницький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7756-5179>, Матвієнко М.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1020-0415>,

Мяльниця Г.П., – <https://orcid.org/0000-0003-2144-4519>, Квасницька Ю.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>,

Бутурля Є.А., – <https://orcid.org/0000-0003-2604-5664>

© В.В. Квасницький, М.В. Матвієнко, Г.П. Мяльниця, Ю.Г. Квасницька, Є.А. Бутурля, 2021

стю та довготривалою міцністю. Розв'язання цих задач є вельми актуальним для розвитку суднового газотурбобудування. Актуальність розробок суттєво зростає при паянні матеріалів нового покоління, що забезпечують вищі робочі температури та ресурс, зокрема, сплавів CM93-BI і CM96-BI для суднових ГТ.

Аналіз наукових публікацій щодо припоїв та технологій паяння ЖНС свідчить, що практично всі вони присвячені розробці припоїв для ЖНС авіаційних турбін, наприклад, ЖС32 [4], ЖС36 [6, 7], ЖС6У [8]. В роботі [8] використовували припій ВПр36, а для зменшення температури паяння додавали припій НС12 на основі системи Ni-12Si.

Для паяння перелічених сплавів застосовували різні припої, наприклад, ВПр24, ВПр27, ВПр36, ВПр37, ВПр44 (Росія) [9], ВН-2, ВН-3 (КНР) [10]. Припої ВПр36, ВПр37, ВПр44 рекомендовані документом ПО 13-2011 ВІАМ для застосування в дослідному виробництві авіаційної промисловості з метою паяння жароміцних сплавів, зокрема, і на основі інтерметаліду Ni_3Al .

В роботі [9] для паяння сплаву ВКНА-4У на основі Ni_3Al зі сплавом ЕП975 використовували складнолеговані припої ВПр24, ВПр27, ВПр47, ВПр48, ВПр36 для з'єднання диска з лопатками. Наведені в роботі результати свідчать, що всі припої окрім припою ВПр36 утворювали евтектичні прошарки, які суттєво зменшують міцність спаяних з'єднань.

В роботі [10] для паяння сплаву ІС10 при температурі 1250...1270 °С використовували припій з бором в якості депресанта. В роботах [4, 9] для паяння сплавів ЖС36 і ЖС32 досліджено припої ВПр37 та ВПр44 з температурою паяння вище 1260 °С, які є неприйнятними для сплавів CM93-BI та CM96-BI.

Останнім часом в роботі [11] розроблено припої, в яких в якості депресанту використовують Zr. За результатами паяння обрано два припої з концентраціями 1,0...2,0 мас. % Zr системи Ni-Cr-Ti-Nb-Al-(Me)-Zr для паяння інтерметалідних сплавів при температурі близько 1250 °С. Розробляються також припої з використанням паладію, які поки що знаходяться на стадії вивчення. В розглянутих роботах методика розробки припоїв не відображена. Аналіз літератури також показав, що публікацій щодо розробки припоїв для суднових газових турбін не виявлено.

Метою проекту є розробка припою та технології паяння жароміцних нікелевих сплавів CM93-BI і CM96-BI для виготовлення суднових ГТ нового покоління з високотемпературною міцністю спаяних з'єднань не нижче за 80 % від основного металу. Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- запропонувати методику розробки припою з використанням комп'ютерних програм, що визначають розподіл легуючих елементів по фазах, стабільність структури та зміцнення ЖНС;

- обрати раціональне легування основи припою і ефективні депресанти;

- визначити температуру паяння та інші важливі характеристики припою;

- дослідити поверхневі властивості припою та його взаємодію зі сплавами CM93-BI і CM96-BI;

- визначити структуру, хімічний склад і властивості спаяних з'єднань;

- розробити технологію паяння сплавів CM93-BI і CM96-BI та виправлення поверхневих дефектів відливок з ЖНС.

Для визначення складу припою запропоновано використовувати методику, що складається з двох етапів [12]. На першому етапі визначають хімічний склад основи припою з урахуванням особливостей умов роботи лопаток суднових ГТ і досягнень металознавства ЖНС. На цьому етапі використовують комп'ютерні програми, які є в розробників та виробників ЖНС. До складу основи припою запропоновано додатково вводити хімічні елементи, які є більш ефективними щодо її зміцнення.

В подальшому шляхом розрахунків із застосуванням комп'ютерних програм визначалися раціональні межі вмісту легуючих елементів в основі припою з урахуванням їх взаємного впливу на кількість та будову фаз, що зміцнюють, розподіл елементів по фазах, невідповідність параметрів кристалічної будови γ - та γ' -фаз, кількість електронних вакансій, критичні температури, фізико-механічні властивості сплавів. Одним з головних критеріїв вибору раціональних меж легування є мінімізація схильності сплавів до утворення крихких топологічно щільноупакованих (ТЩУ) фаз.

За основу припою обрано сплав CM93-BI, який легований Re у кількості 2,4...2,8 мас. % та Ta – 3,3...3,6 мас. %, оскільки відомо, що реній ефективно зміцнює ЖНС, а тантал підвищує термічну стабільність γ' -фази.

За результатами розрахунків встановлено надлишкове легування сплавів елементами, що збільшують схильність до утворення ТЩУ фаз, зокрема, Cr, Mo, W, Re. Оскільки найбільшу кількість електронних вакансій має саме W, то в основі припою його вміст зменшений до 2,0...3,0 мас. %. З метою підвищення стійкості сплаву до високотемпературної корозії концентрація Cr була збільшена до 14,5 мас. %. У сплав введено до 6,2 мас. % Ti для зменшення температур ліквідуса і солідуса та утворення зміцнюючої γ' -фази. Інші елементи мають близькі до вихідного сплаву CM93-BI концентрації. Середній вміст елементів основи припою складає (мас. %): 13,0 Cr; 7,0 Co; 4,0 Al; 4,5 Ta;

3,75 Re; 2,5 W; 1,5 Mo; 5,45 Ti; 0,25 Hf; 0,575 Zr; 0,4 Nb; 0,07 C; Ni – решта.

В якості депресанта безальтернативно обрано бор. Визначити кількість бору можна лише експериментально, виплавляючи сплави з різною концентрацією бору. Перший припій виплавили з концентрацією бору 0,75 мас. %, але він погано розтікався навіть при температурі 1230 °C.

Для зменшення кількості експериментальних плавок виплавили сплав з п'яти елементів, який позначили 4Д з хімічним складом 14 Cr; 9,5 Co; 2,5 Al; 2,4 В, решта – нікель. Сплав 4Д додавали до першої плавки припою SBM-4 в кількості 10, 20, 30 %, що дозволило поступово змінювати концентрацію бору. При введенні 10...30 % сплаву 4Д концентрація бору збільшується від 0,915 до 1,245 %.

Також використовувався метод планування експерименту для зменшення кількості експериментальних досліджень та побудову регресійної моделі. Коефіцієнти моделі перевіряли через критерій Стюдента (*t*-критерій), необхідний для визначення значимості коефіцієнтів рівняння регресії. Для цього була висунута гіпотеза, що параметр або статистична характеристика коефіцієнту рівняння незначно відрізняються від нуля. Разом з цим була висунута альтернативна гіпотеза, що параметр або статистична характеристика значно відрізняються від нуля. Якщо основна гіпотеза невірна, то за істину приймається альтернативна.

Адекватність математичної моделі була перевірена через F-тест, або за критерієм Фішера. Згідно критерія Фішера була висунута нуль-гіпотеза, виконання якої визначає, що розрахункове математичне очікування дорівнює відомому (експериментальному) очікуванню. Для розрахунку F-критерія використовують дисперсії відтворюваності та адекватності.

За результатами досліджень концентрацію бору в припої SBM-4 прийняли рівною 1,0...1,2 мас. %. За середніми значеннями концентрації бору та вмісту легуючих елементів основи припою виплавлений припій SBM-4 для промислового використання. Вміст хімічних елементів в припої SBM-4 складає, мас. %: 12,5...14,5 Cr; 6,5...7,5 Co; 3,0...5,0 Al; 3,0...6,0 Ta; 3,0...4,5 Re; 2,0...3,0 W; 1,0...2,0 Mo; 4,7...6,2 Ti; 0,2...0,3 Hf; 0,45...0,7 Zr; 0,3...0,5 Nb; 1,0...1,2 В; 0,04...0,10 C; Ni – решта.

При використанні припою, що містить 1,0...1,2 мас. % бору, структурна будова основного металу і шва є ідентичними. За результатами експериментальних досліджень взаємодії припою з основним металом встановлено, що при температурі паяння 1210...1235 °C припій володіє заданими технологічними властивостями.

Після паяння та термічної обробки боридних евтектик у з'єднаннях не виявлено.

Легування Та дозволяє підвищити стійкість сплавів до окиснення та високотемпературної корозії. При дослідженні жаровини було виявлено, що в ній поряд із захисними оксидами NiO, CoO і Cr₂O₃ присутній також оксид Ta₂O₅, який не взаємодіє з сульфатом натрію та утворює щільну захисну плівку, яка зменшує швидкість високотемпературної корозії.

Відомо, що сплави CM93-BI та CM96-BI мають високу стійкість проти ВСК, тому було важливо визначити вплив бору в припої SBM-4 на стійкість проти неї. Для цього були виплавлені сплави CM93-BI та CM96-BI з концентраціями бору 1,0, 1,2, 1,5, 2,0 та 2,5 мас. %. Випробування проводили при температурі 900 °C протягом 20 год в розплаві солей 25 % NaCl + 75 % Na₂SO₄. Установлено, що при концентрації бору 1,2 % стійкість сплавів проти ВСК не зменшилась. Після виплавлення припою SBM-4 виготовлені циліндричні зразки та проведені дослідження щодо їх стійкості проти ВСК.

Дослідження структури та хімічного складу спаяних з'єднань проводили на зразках, які паяли в одній садці зі зразками для механічних випробувань або на зразках після механічних випробувань. Для проведення механічних випробувань зразки паяли при температурі 1210...1215 °C з витримкою до 15 хв. та наступним охолодженням до 1070 °C і витримкою 60 хв.

Сплави CM93-BI та CM96-BI застосовують для виготовлення лопаток з полікристалічною та спрямованою структурами. Оскільки виготовлення декількох зразків зі спрямованою структурою вимагає спеціальної підготовки, то в роботі використовували полікристалічні зразки. Межа міцності $\sigma_{\text{в}}$ спаяних з'єднань знаходилась на рівні основного металу. Довготривала міцність для з'єднань полікристалічних сплавів CM93-BI і CM96-BI складає 0,91 і 0,89 відповідно.

Дефекти лопаток можуть виявлятися на різних етапах їх виготовлення та експлуатації. Найбільш передбачуваними є дефекти відливок лопаток. Незважаючи на постійне удосконалення вогнетривких сумішей для виготовлення керамічних ливарних форм, стрижнів, тиглів, фільтрів та технології лиття, вихід придатних лопаток не досягає 100 %.

Більша частина дефектів лиття носять поверхневий характер. Найчастіше зустрічаються дефекти у вигляді шлакових включень, «корольків» та інших забруднень з розміром до 3,0 мм, значно менше несучільностей, недоливів і тріщин. Технологічними інструкціями (ТІ) НПКГ «Зоря»-«Машпроект» всі дефекти поділяються на такі, для яких виправлення не допускаються і поверхневі дефекти виправлення яких проводиться залежно від зони розміщення на лопатці, розмірів дефектів

та відстані між ними. На лопатках виділені зони та критерії, за якими дозволяється виправлення дефектів. Наприклад, на входних і вихідних крайках лопаток виправлення дефектів не допускається. Не виправляються поверхні силових бортів лопаток, радіуси переходів пера лопатки в хвостовик тощо. Інші дефекти обмежуються по глибині, кількості, розміру, категорії конструкцій. По мірі розвитку паяння в технологічні документи вносяться доповнення (2019 р.) і узгоджують нові інструкції.

Залежно від розміру дефекту його виправлення проводиться без наповнювача або з наповнювачем. Малі дефекти (визначається згідно ТІ) виправляються припоєм SBM-4 без наповнювача, дефекти типу раковин розробляються як показано на рис. 1 для лопаток з полікристалічною структурою зі сплаву CM93-BI.

Виправлення дефектів лиття починається з їх виявлення після очищення і слюсарної обробки (дефектація). Перед виправленням дефектів лопатки повинні пройти весь ступінчастий цикл термічної обробки, включаючи гомогенізацію при температурі 1180 °С відповідно до Технологічного процесу. Розміри дефектів, що підлягають виправленню після розробки повинні відповідати вимогам нормативних документів. Місця, що підлягають виправленню, повинні розроблюватися до повного видалення дефекту під кутом $90^\circ \leq \beta \leq 120^\circ$ відповідно до рис. 1. Поверхня лопатки навколо дефекту повинна бути очищена від оксидів на відстані не менше за 5 мм.

На рис. 2 показано ескіз робочої неохолоджуваної лопатки з монокристалічною структурою зі сплаву CM96-BI та зони розміщення дефектів,

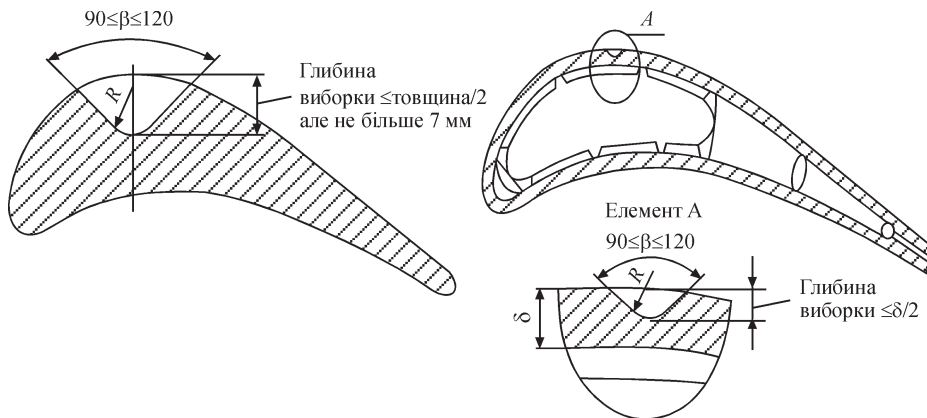


Рис. 1. Розробка поверхневого дефекту типу раковини лопатки з полікристалічною структурою зі сплаву CM93-BI

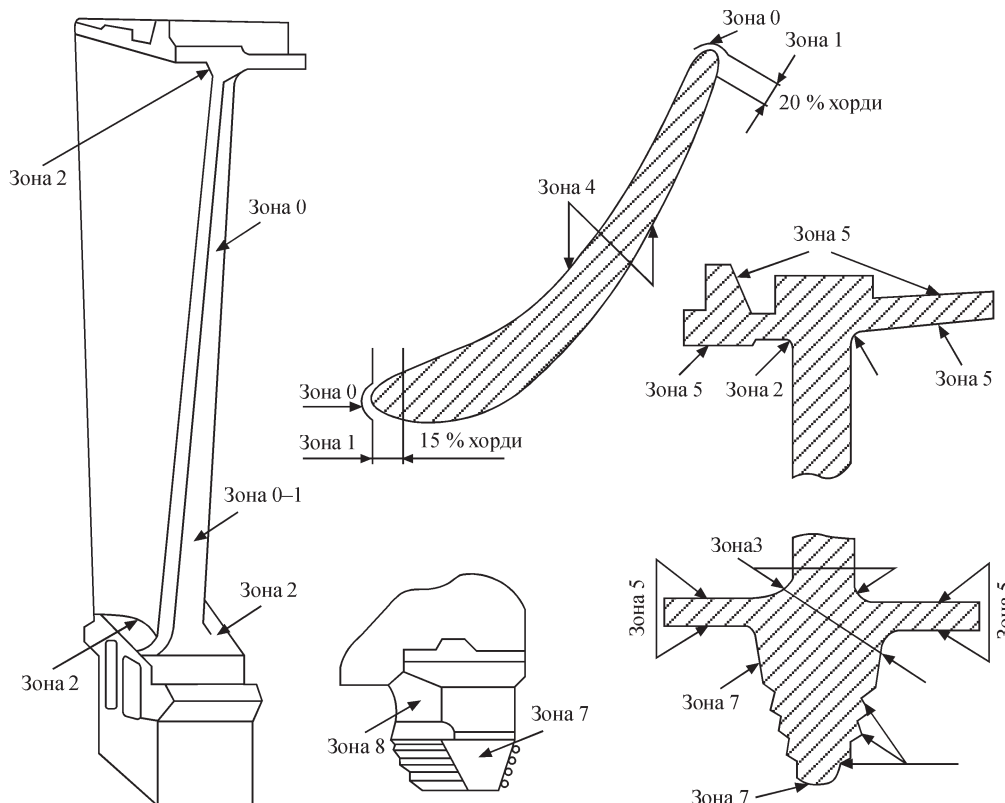


Рис. 2. Схема робочої неохолоджуваної лопатки з монокристалічною структурою зі сплаву CM96-BI

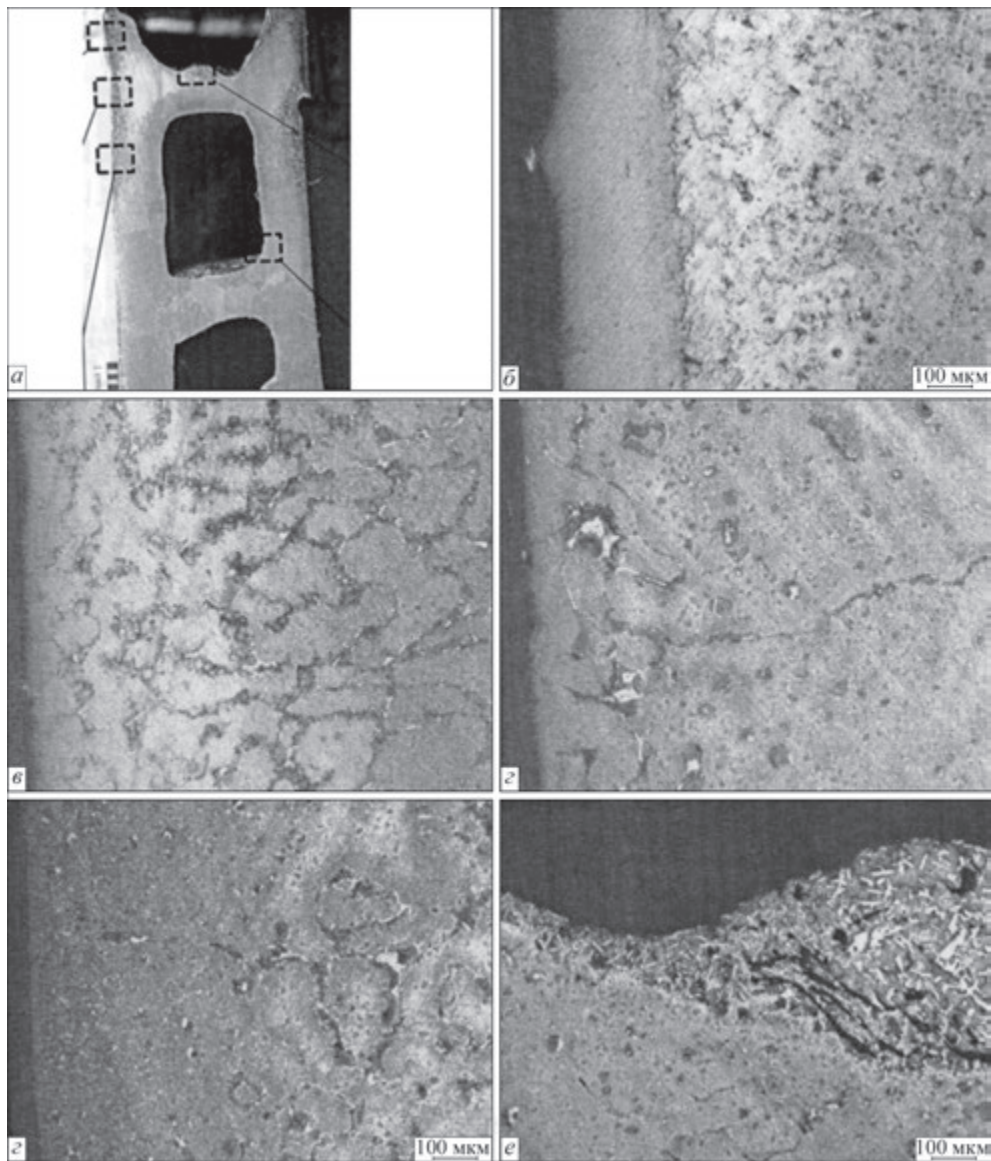


Рис. 3. Макрошліф лопатки (а), мікроструктура з виправленими поверхневими дефектами (б, в, г), основного металу (д) та запаяного знакового отвору (е)

в яких інструкціями підприємств регламентуються розміри припустимих до виправлення дефектів робочих лопаток ГТ. Розміщення і розміри дефектів, які є допустимими для виправлення на робочих лопатках регламентуються інструкціями підприємств.

На рис. 3 показано макрошліф лопатки зі сплаву СМ93-ВІ та мікроструктуру металу з виправленими поверхневими дефектами та запаяним знаковим отвором. Макрошліф в зоні виправлення поверхневого дефекту на «кориті» лопатки з нанесеним захисним покриттям показано на рис. 4.

Перед нанесенням порошку для виправлення поверхню дефекту необхідно знежирити спиртом або протерти бязевою тканиною, змоченою ацетоном.

В якості наповнювача використовується порошок сплаву СМ88У-ВІ, який випускається централізовано «Укрспецсталлю» або високотемператур-

ний припій SBM-3, розроблений в НУК і НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Наповнювач та припій SBM-4 являють собою суміш у співвідношенні 1:1. Порошкова суміш закріплюється на поверхні лопатки 5%-м розчином смоли БМК-5 в ацетоні. Кількість композиційного порошку повинна бути більшою ніж об'єм розробленого дефекту на 40...50 %. Виправлення дефектів проводиться за тими самими параметрами режимів, що і паяння.

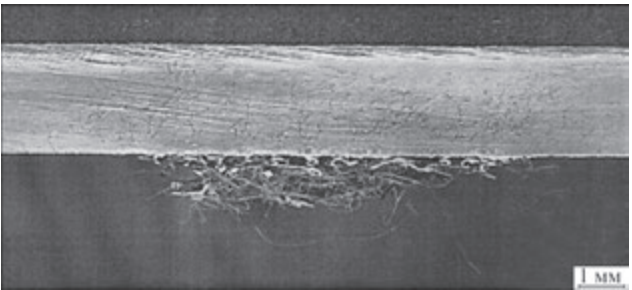


Рис. 4. Макроструктура металу лопатки в зоні виправлення поверхневих дефектів з нанесеним захисним шаром покриття

Припій SBM-4 добре заповнює зазори та не впливає на структуру основного металу. Тріщини або мікротріщини під час виправлення дефектів через використання припою також не спостерігаються.

Слід відзначити, що для сучасного покоління суднових турбін для виправлення поверхневих дефектів використовують припої ВПр11-40Н з температурою плавлення 1020 °С і НС12 з температурою плавлення близько 1150 °С, що призводить до підплавлення з наступним руйнуванням захисного покриття. Сплави СМ93-ВІ та СМ96-ВІ дозволяють підвищити температуру паяння до 1230 °С, використовуючи припій SBM-4, та підвищити ресурс та робочу температуру газу в турбіні.

Висновки

1. Використана двоетапна методика розробки припою, згідно якої на першому (розрахунковому) етапі визначають раціональні межі концентрації легуючих елементів в основі припою, невідповідність параметрів будови γ - та γ' -фаз, критичні температури, кількість електронних вакансій. Одним з найголовніших критеріїв раціонального вмісту легуючих елементів є мінімізація схильності до утворення ТЩУ-фаз, зокрема, крихкої σ -фази. На другому – експериментальному етапі визначається раціональний вміст елементів депресантів.

2. Припій SBM-4 при промислово-дослідних випробуваннях показав високі технологічні властивості та дозволяє підвищити температуру робочого газу в турбіні.

3. Температура паяння і плавлення припою SBM-4 виключає його взаємодію з захисним покриттям системи Co–Cr–Al–Y та Y_2O_3 при його нанесенні та при термічній обробці.

4. На припій SBM-4 розроблено Тимчасові технічні умови УКФА 360.107.002-ВТУ і Технологічну інструкцію на виправлення поверхневих дефектів методом паяння у вакуумі УКФА 387.341.002-ТІ.

5. Паяння полікристалічних лопаток зі сплаву СМ93-ВІ виконується при температурі 1200...1215 °С, а зі сплаву СМ96-ВІ з монокристалічною або спрямовано-закристалізованою структурами при температурі 1220...1230 °С протягом 15 ± 5 хв. Після паяння лопатки охолоджуються до температури 1070 °С і витримуються 60 хв., далі продовжується охолодження у вакуумі до температури 200 °С.

6. Для виправлення дефектів в якості наповнювача може бути використаний порошок сплаву СМ88У-ВІ, який випускається централізовано «Укрспецсталлю» або високотемпературний припій SBM-3, розроблений в НУК і НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Наповнювач та припій

SBM-4 змішуються у співвідношенні 1:1. Для закріплення суміші використовується 5%-й розчин смоли БМК-5 в ацетоні. Кількість композиційного порошку повинна бути більшою за об'єм розробленого дефекту на 40...50 %. Виправлення дефектів проводиться за тими ж параметрами режимів, що і паяння.

Список літератури

1. Каблов Е.Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологии*, **5**, 24–30.
2. Кривов Г.О., Зорыкин К.О. (2012) *Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів*. КБЦ.
3. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів: підручник*. Хорунов В.Ф. і Квасницький В.Ф. (ред.) Миколаїв, НУК.
4. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. (2012) Особенности пайки монокристаллических отливок из сплава ЖС32. *Сварочное производство*, **5**, 24–30.
5. Мьяльниця Г.П., Максютя І.І., Квасницька Ю.Г., Михнян О.В. (2013) Вибір легуючого комплексу нового корозійностійкого сплаву для соплових лопаток ГТД. *Металознавство та обробка металів*, **2**, 29–34.
6. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. (2010) Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС36. *Технология машиностроения*, **5**, 21–25.
7. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Лукин В.И., Рыльников В.С. (2010). Технология получения неразъемных соединений из сплава ЖС36. *Сварочное производство*, **7**, 27–31.
8. Малащенко И.С., Мазурак В.Е., Кушнарева Т.Н. и др. (2014). Пайка в вакууме литого никелевого сплава ЖС6У композиционными припоями на основе ВПр-36. Ч. 1. *Современная электрометаллургия*, **4**, 26–42.
9. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Тимофеева О.Б. (2013). Особенности технологии диффузионной пайки жаропрочного сплава ЭП975 и литейного монокристаллического интерметаллидного сплава ВК-НА-4У применительно к конструкции «Блиск». *Сварочное производство*, **7**, 19–25.
10. Yue, X., Liu, F., Chen, H. et al. (2018). Effect of Bonding Temperature on Microstructure Evolution during TLP Bonding of a Ni₃Al based Superalloy IC10. *MATEC Web of Conferences*, **206**, 11. 03004.
11. Максимова С.В. (2014) Припой без бора и кремния для пайки жаропрочного никелевого сплава. *Автоматическая сварка*, **8**, 15–21.
12. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Kvasnytskyi, V. et al. (2020) Designing brazing filler metal for heat-resistant alloys based on Ni₃Al intermetallic. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **6**, **12** (108), 6–19.

References

1. Kablov, E.N. (2012) Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **5**, 24-30 [in Russian].
2. Kryvov G.O., Zorykin K.O. (2012) *Production of welded structures: Manual for students of higher educational instit.*, Kyiv. KVITs [in Ukrainian].
3. Yermolaiev, H.V., Kvasnytskyi V.V., Kvasnytskyi, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials: Manual*. Ed. by V.F. Khorunov, V.F. Kvasnytskyi. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
4. Lukin, V.I., Rylnikov, V.S., Afanasiev-Hodykin, A.N. (2012) Features of brazing of single-crystal castings from ZhS32 alloy. *Svaroch. Proizvodstvo*, **5**, 24-30 [in Russian].
5. Mialnytsia, H.P., Maksyuta, I.I., Kvasnytska, Yu.H., Mykhnyan, O.V. (2013) Selection of an alloying complex for a new corrosion-resistant alloy of GTE blades. *Metaloznnavstvo ta Obrobka Metaliv*, **2**, 29-34 [in Ukrainian].

6. Lukin, V.I., Ryl'nikov, V.S., Afanasiev-Hodykin, A.N. (2010) Peculiarities of producing of the brazed joints of the alloy ZhS36. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 5, 21-25 [in Russian].
7. Afanasiev-Hodykin, A. N., Lukin, V. I., Ryl'nikov, V. S. (2010) Technology for producing permanent joints from ZhS36 alloy. *Svarochn. Proizvodstvo*, 7, 27–31 [in Russian].
8. Malashenko, I.S., Mazurak, V.E., Kushnareva, T.N. et al. (2014) Vacuum brazing of cast nickel alloy ZhS6U with composite brazing fillers based on VPr-36 (Pt 1). *Sovrem. Elektrometallurgiya*, 4, 26-42 [in Russian].
9. Lukin, V.I., Ryl'nikov, B.C., Afanasiev-Hodykin, A.N., Timofeeva, O.B. (2013) Features of diffusion brazing technology of EP975 heat-resistant alloy and VKNA-4U casting monocrystalline intermetallic alloy as applied to the “Blisk” design. *Svarochn. Proizvodstvo*, 7, 19-25 [in Russian].
10. Yue, X., Liu, F., Chen, H., Wan, D., Qin, H. (2018) *Effect of bonding temperature on microstructure evolution during TLP bonding of a Ni₃Al based Superalloy IC10*. MATEC Web of Conferences, 206, 11. 03004.
11. Maksymova, S.V. (2014) Brazing filler metal without boron and silicon for brazing heat-resistant nickel alloy. *The Paton Welding J.*, 8, 15-21 [in Russian].
12. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Kvasnytskyi, V. et al. (2020) Designing brazing filler metal for heat-resistant alloys based on Ni₃Al intermetallide. *Eastern-Europ. J. of Enterprise Technologies*, 6, 12(108), 6-19.

DEVELOPMENT OF BRAZING ALLOY, BRAZING TECHNOLOGIES AND CORRECTION OF CASTINGS SURFACE DEFECTS OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS FOR SHIP GAS TURBINES

V.V. Kvasnytskyi¹, M.V. Matvienko², H.P. Mialnitsa³, I.H. Kvasnytska⁴, Ye.A. Buturlia⁵

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: kvas69@ukr.net

²Kherson branch Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 44 Ushakov Str., 73003 Kherson, Ukraine

³Gas Turbine Research and Production Complex Zorya-Mashproekt, 42-a Bogoyavlenskiy Ave., 54018, Mykolaiv, Ukraine

⁴Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, 34/1 Vernadskogo, 03142, Kyiv, Ukraine.

⁵Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Geroev Ukrainy Ave., 54000, Mykolaiv, Ukraine

The aim of the work was to develop brazing alloy and brazing technology of heat-resistant nickel alloys CM93-BI and CM96-BI, used in the production of new generation ship gas turbines. A prerequisite was to provide high-temperature strength of the brazed joints not lower than 80% of the strength of the base metal. During the development of the brazing alloy, a two-stage procedure was used, where at the first (calculation) stage the required concentrations of alloying elements in the base of brazing alloy, non-compliance of γ - and γ' -phases structure parameters, critical temperatures, number of electronic vacancies, physical and mechanical properties of alloys were determined. At the second (experimental) stage, the rational content of the number of depressant elements was determined. As a depressant, boron was chosen. It was established that when using a brazing alloy containing 1.0...1.2 wt. % of boron, the structural structure of the base metal and the weld are identical. After brazing and heat treatment, boride eutectics in the brazed joints were not detected. It was established that within the determined limits boron does not reduce the resistance of welded joints to high-temperature salt corrosion. The surface properties of the brazing alloy and its interaction with the alloys CM93-BI and CM96-BI were studied. The developed SBM-4 brazing alloy showed high technological properties and allows raising the temperature of working gas in gas turbines. The developed technology of brazing CM93-BI and CM96-BI alloys provided the tensile strength σ_t at the level of the base metal. The long-term strength of the welded joints at a temperature of 900 °C was equal to 314... 321 MPa on the basis of 100 h, which amounts to 0.89...0.91 of long-term strength of polycrystalline alloys. The technology of correction of blade defects by SBM-4 brazing alloy was developed. 12 Ref., 4 Fig.

Key words: brazing alloy, heat-resistant nickel alloys, brazing technology, correction of casting defects, depressant elements, boron, gas turbines, blade

Надійшла до редакції 02.02.2021

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/trwj
Передплатний індекс 21791



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



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

(380-44) 200-8277
journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України

НОВІ АЛГОРИТМИ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ЗВАРЮВАННЯ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН*

Г.С. Маринський¹, К.Г. Лопаткіна¹, О.В. Чернець¹, С.Є. Подпрятів^{1,2}, В.А. Ткаченко¹,
І.О. Белоусов², В.А. Васильченко¹

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

²Київська міська клінічна лікарня № 1. 02091, м. Київ, вул. Харківське шосе, 121. E-mail: KCRZ@ukr.net

Проведені дослідження впливу нових алгоритмів зварювання біологічних тканин на температурні показники процесу в зоні шва та біофізичні і структурні характеристики тканин, що зварюються з використанням удосконаленої системи керування апаратів серії ЕКВЗ-300. Вивчено вплив нових експериментальних алгоритмів високочастотного зварювання біологічних тканин на температурні показники процесу та характеристики тканин різних видів в зоні шва. Бібліогр. 9, рис. 6.

Ключові слова: високочастотне зварювання, біологічні тканини, апарат ЕКВЗ-300 «ПАТОНМЕД», алгоритми зварювання, температурні показники процесу, структурні та біофізичні зміни тканин, дослідницький комплекс

В медичних закладах України, починаючи з 2002 р., в хірургічній практиці активно застосовується технологія високочастотного (ВЧ) зварювання біологічних тканин з використанням апаратури, розробленої в Інституті електрозварювання ім. С.О. Патона, що має суттєві переваги у порівнянні з іншими процесами при проведенні навіть найскладніших операцій різного профілю [1–5].

В той же час, для подальшого розвитку, розширення сфер використання та підвищення ефективності застосування високочастотної технології в хірургічній практиці необхідно постійне удосконалення існуючих і розробка нових алгоритмів процесу та відповідного обладнання для їхньої реалізації. В зв'язку з цим проведення комплексних досліджень структурних, біофізичних характеристик зони шва, а також температурних показників процесу з'єднання та обробки біологічних тканин під впливом високочастотного струму, що подається по різним алгоритмам є, безумовно, актуальним.

Метою даної роботи є вивчення впливу нових експериментальних алгоритмів ВЧ зварювання біологічних тканин на температурні показники процесу, зміни характеристик тканин в зоні шва, а також фіксація і аналіз переваг застосування розроблених алгоритмів у порівнянні з тими, що використовуються в даний час.

Об'єктами досліджень були видалені органи свині, а саме: тонка та товста кишки, шлунок, бронхи та інші.

Експерименти проводили на універсальному дослідницькому комплексі (рис. 1) [6–8], до складу якого входять:

- модернізовані апарати типу ЕКВЗ-300 з розширеними технологічними можливостями – спеціальними системою керування та програмного продукту, які забезпечують реалізацію як стандартних алгоритмів зварювання, так і нових, що мають особливий характер енергетичного впливу на об'єкт дослідження;
- спеціалізований дослідницький стенд, обладнаний різноманітними базовими і експериментальними електродами (рис. 2);
- робочі біполярні інструменти та їхні макети;
- вимірювальне та фіксуюче обладнання.

Цей комплекс, що постійно модернізується та вдосконалюється, забезпечує можливості для проведення широких досліджень процесу, в тому числі вивчення впливу на його температурні показники, біофізичні та структурні властивості різних біологічних тканин в зоні шва таких характеристик як:

- різних алгоритмів зварювання;
- питомого тиску електродів на тканини, що зварюються (в межах від 0 до 4 Н/мм²);
- різноманітних конструкцій інструментів з електродами різної геометрії (площа електродів в межах від 2,0 до 270 мм²).

В ході даної серії експериментів фіксували як основні електричні та механічні (питомий тиск тощо) характеристики процесу, так і температури тканин безпосередньо в зоні шва. Вимірювання температури здійснювали заізовольованими термопарами, що були вмонтовані в тіла електродів і безпосередньо контактували із зварюваним матеріалом. Одночасно контролювали температуру безконтактним методом за допомогою тепловізора.

*В роботі брали участь: Ю.З. Буряк¹, В.К. Сердюк¹, С.С. Подпрятів², С.Є. Мацас¹, Н.А. Чвертко¹, В.О. Бисько¹, С.Д. Грабовський¹.

Маринський Г.С. – <https://orcid.org/0000-0003-0753-0154>, Лопаткіна К.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-7604-6174>,

Чернець О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8537-2302>, Ткаченко С.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2983-778X>,

Подпрятів С.Є. – <https://orcid.org/0000-0003-1350-7532>, Белоусов І.О. – <https://orcid.org/0000-0003-1624-7019>

© Г.С. Маринський, К.Г. Лопаткіна, О.В. Чернець, С.Є. Подпрятів, В.А. Ткаченко, І.О. Белоусов, В.А. Васильченко, 2021



Рис. 1. Дослідницький комплекс ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Для проведення досліджень використовували як визначені в попередніх роботах, так і нові варіанти алгоритмів, що мають забезпечити якісні зварні з'єднання при зменшенні протяжності зони термічного впливу (ЗТВ), зниження температури процесу, відсутність обуглення в зоні шва і ЗТВ та відсутність «налипання» тканин до електродів [9].

При випробуванні алгоритмів зварювання для оцінки якості з'єднань та вивчення біофізичних та структурних характеристик тканин проводили візуальну оцінку, механічні та гідравлічні випробування, а також гістологічні дослідження.

Нижче частково представлені результати експериментальних досліджень, що були проведені на видалених тонких кишках та бронхах свині.

Випробування нових алгоритмів зварювання було здійснено при лінійному зварюванні тонкої кишки свині (товщина стінки 0,6...0,8 мм, діаметр 25...28 мм) на модернізованому стенді спеціальним експериментальним біполярним затискачем з електродами площею 45 мм², міжелектродним зазором 0,05 мм, та питомим тиском між електродами 2,6 Н/мм².

Представлено результати, що були отримані при дослідженні впливу розроблених нових алгоритмів зварювання, згідно з якими здійснювали подачу заданої напруги модульованими імпульсами визначеної тривалості, що дорівнювали 0,1 та 1,0 с. При цьому

значення величини напруги та загальна тривалість її подачі в обох випадках лишались незмінними.

В ході випробування обох варіантів алгоритмів між біполярними електродами формувалось лінійне зварне з'єднання тонкої кишки без виділення пари та диму, без «налипання» дотичних до електродів тканин та тканин в зоні шва. За візуальною оцінкою та результатами механічних випробувань зварних з'єднань дослідних тканин тонкої кишки при використанні вище згаданих алгоритмів отримано якісне, міцне, еластичне, суцільне та герметичне зварне з'єднання. По всій площі зварного шва тканина на просвіт була однакового кольору. В зоні шва та в зоні термічного впливу відсутні деформація, обуглення та спазм тканин. Сформований зварний шов без перфорації, складався зі щільної однорідної тканини.

Процес зварювання дослідних зразків тонкої кишки з використанням зазначених вище алгоритмів відбувався при температурі, що не перевищувала в умовах експериментів 60...70 °С та була суттєво нижчою, ніж при застосуванні алгоритмів, що застосовувалися раніше.

На рис. 3 наведені температурні показники процесу при випробуванні нових експериментальних алгоритмів зварювання тонкої кишки (№ 1 – тривалість імпульсів та пауз 0,1 с; № 2 – тривалість імпульсів та пауз 1,0 с) та стандартних (традиційних) алгоритмів (№ 3 – тривалість імпульсів 1,0 с, тривалість пауз 0,2 с; № 4 – тривалість імпульсів та пауз 0,2 с).

Слід зазначити, що збільшення протяжності імпульсів з 0,1 с (алгоритм № 1) до 1,0 с (алгоритм № 2) в експериментальних алгоритмах, при інших рівних умовах, практично не позначилось на температурних показниках в умовах експерименту.

Подібні результати були отримані при зварюванні тонкої кишки свині (товщина стінки 0,8...0,9 мм) з використанням експериментальних алгоритмів на стандартному біполярному затискачі (площа електродів 70 мм² без міжелектродного зазору) при суттєво меншому (0,46 Н/мм²) питомому тиску між електродами.

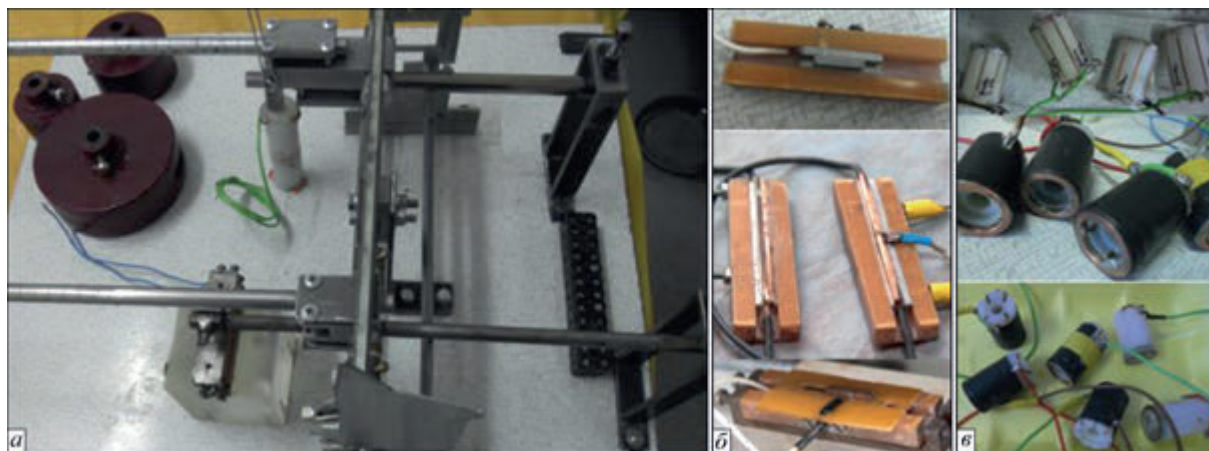


Рис. 2. Спеціалізований дослідницький стенд (а), лінійні (б) та кільцеві (в) електроди

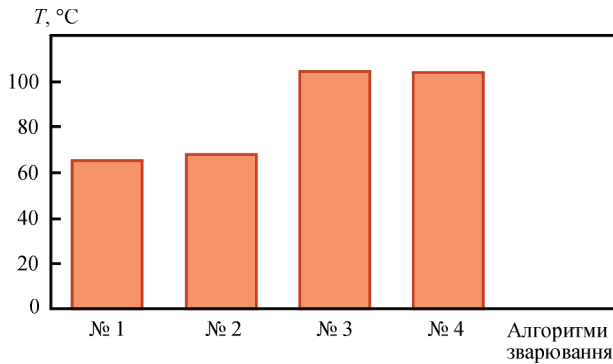


Рис. 3. Середні температурні показники процесу зварювання тонкої кишки в умовах використання нових експериментальних (№ 1, 2) та традиційних (№ 3, 4) алгоритмів зварювання тонкої кишки

Для експериментів в даному випадку був використаний стандартний біполярний затискач, додатково облаштований ізольованою термопарою, що безпосередньо контактувала з тканиною, що зварювалася. Заданий тиск забезпечувався за допомогою системи із наперед заданим зусиллям.

Застосування експериментальних алгоритмів у порівнянні зі стандартними також дозволило суттєво знизити температурні показники процесу. Температура в зоні шва не перевищувала 70 °C.

За візуальною оцінкою та результатами механічних випробувань, на фоні зниження температурних параметрів процесу, запропоновані алгоритми забезпечували якісні та міцні з'єднання з покращеними біофізичними характеристиками тканин в зоні шва та зменшеною зоною термічного впливу (рис. 4).

Іншим дослідним матеріалом, на якому проводили експериментальні роботи, були видалені бронхи свині (товщина стінки 0,5...0,7 мм, діаметр 6,0...6,5 мм). Площа електродів стенду та затискача складала 45 мм², міжелектродний зазор – 0,05 мм, питомий тиск між електродами – 2,6 Н/мм².

Запропоновані алгоритми дозволили суттєво скоротити загальний час дії ВЧ струму на тканину,

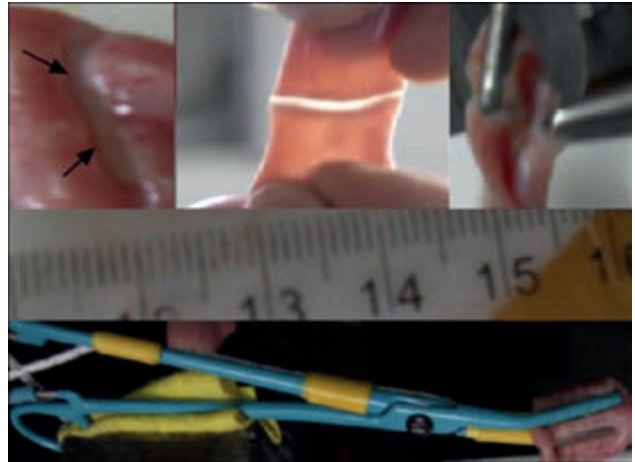


Рис. 4. Зварне з'єднання тонкої кишки, отримане з застосуванням модульованих імпульсів. Зварювання виконували з використанням стандартного біполярного затискача (площа електродів 70 мм², питомий тиск між електродами 0,46 Н/мм², без міжелектродного зазору), додатково облаштованого термопарою

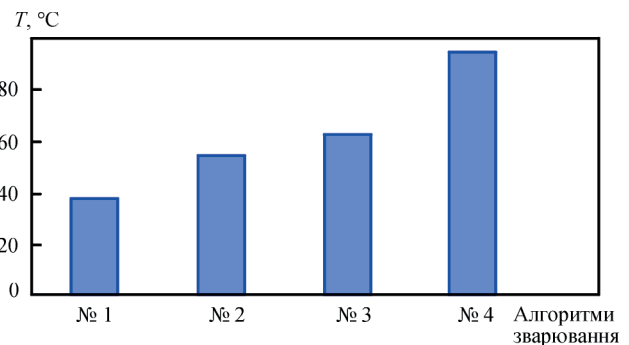


Рис. 5. Температурні показники процесу перекриття бронхів в умовах застосування нових експериментальних (№ 1, 2, 3) та існуючого на даний час (№ 4) алгоритмів зварювання.

отримати герметичне перекриття бронхів та знизити температурні показники процесу. Використання нових алгоритмів зварювання загальною тривалістю від 0,1...2,0 с дозволило отримати кращі результати температурних показників процесу у порівнянні з результатами, отриманими при використанні раніше визначених алгоритмів значно більшої загальної



Рис. 6. Випробування зварних швів бронхів, отриманих в умовах застосування спеціальних алгоритмів зварювання: а – перевірка на прохідність; б – гідрравлічні випробування

тривалості (6...12 с). Температура в момент перекриття бронхів при випробуванні нових алгоритмів не перевищувала 40...70 °С, що майже вдвічі менша (рис. 5) від температури, зафіксованої при застосуванні більшості інших раніше визначених алгоритмів зварювання бронхів.

На рис. 5 показані температурні показники процесу з застосуванням нових алгоритмів зварювання бронхів загальною тривалістю 0,1 с (№ 1), 0,5 с (№ 2), 0,8 с (№ 3) та алгоритму загальною тривалістю 8 с, що використовується в даний час (№ 4).

Найбільш якісні перекриття бронхів, в умовах проведення даного етапу експериментів, відбулись, за візуальною оцінкою, при температурі процесу 47...65 °С загальною тривалістю впливу високочастотного струму на тканину в зоні шва 0,5...1,5 с. Обвуглення, спазму та «налипання» тканин до електродів в умовах експериментів не спостерігали. Зона термічного впливу знаходилась в межах 0...0,1 мм. На відібраних зразках з якісним перекриттям бронхів проводили перевірку на герметичність (рис. 6, а) і механічні та гідравлічні випробування (рис. 6, б).

Визначене за візуальною оцінкою якісне перекриття бронхів, що було отримане за вище вказаних умов, при гідравлічних випробуваннях витримувало 1000...1500 мм водяного стовпа.

Результати досліджень впливу нових алгоритмів зварювання на тканину бронхів показали перспективність їх застосування та необхідність проведення подальших експериментальних робіт.

Висновки

1. Результати проведених експериментальних робіт показали, що застосування нових експериментальних алгоритмів зварювання біологічних тканин забезпечує помітні переваги в порівнянні із раніше визначеними алгоритмами зварювання. Це отримання якісних швів при зниженні температурних показників процесу та покращення біофізичних характеристик тканин в зоні шва і в ЗТВ.

2. За візуальною оцінкою, механічними та гідравлічними випробуваннями зразків тканин різного типу встановлено, що нові оригінальні алгоритми з'єднання, які можуть бути реалізовані при використанні розробленої системи керування апаратами, дозволяють отримувати якісні з'єднання біологічних тканин при мінімальному питомому тиску електродів і забезпечують мінімальну температуру нагрівання тканин, що з'єднуються, та мінімальну протяжність ЗТВ, що в свою чергу вказує на перспективність застосування запропонованих алгоритмів та продовження проведення експериментальних досліджень.

Список літератури

1. (2009) *Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия. Атлас*. Патон Б.Е., Иванова О.Н.

(ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Международная Ассоциация «Сварка».

2. Патон Б.Е., Кривцун И.В., Маринский Г.С. и др. (2013) Сварка, резка и термическая обработка живых тканей. *Автоматическая сварка*, **10-11**, 135–146.
3. Подпратов С.Е., Гичка С.Г., Подпратов С.С. та ін. (2012) Структура электросварного шва, як основа нового розвитку хірургії. *Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы. Мат. VII между. науч.-практ. конф., г. Киев, 30 ноября 2012 г.* Маринский Г.С. (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.
4. (2018) *Зварювання та термічна обробка живих тканин. Теорія. Практика. Перспективи. Мат. XIII наук.-практ. конф. (Київ, 30 листоп.–1 груд.)*. Маринський Г.С. (ред.). Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.
5. Ничитайло М.Ю., Фурманов Ю.О., Гуцуляк А.І. та ін. (2016) Формування білідигестивних та міжкишкових анастомозів в умовах жовчного перитоніту з використанням ВЧ електрозварювання в експерименті. *Клінічна хірургія*, **1**, 65–68.
6. Маринский Г.С., Чернец А.В., Ткаченко В.А. и др. (2016) Стендовые исследования высокочастотной электросварки биологических тканей. *Автоматическая сварка*, **12**, 41–45.
7. Маринський Г.С., Подпратов С.Є., Чернець О.В. та ін. (2018) Дослідження процесів високочастотного зварювання біологічних тканин на спеціалізованому експериментальному комплексі ІЕЗ ім. Є.О. Патона. *Зварювання та термічна обробка живих тканин. Теорія. Практика. Перспективи. Мат. XIII наук.-практ. конф. м. Київ, 30 листоп.–1 груд. 2018 р.* Маринський Г.С. (ред.). Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, сс. 63–67.
8. Лопаткіна К.Г., Маринський Г.С., Чернець О.В. та ін. (2015) Дослідний комплекс для експериментальних досліджень ВЧ зварювання тканин різного типу. *Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы. Мат. X между. науч.-практ. конф., г. Киев, 27-28 ноября. 2015 р.* Маринский Г.С. (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, сс. 40–41.
9. Подпратов С.С., Маринський Г.С., Чернець О.В. та ін. (2018) Дослідження впливу параметрів подавання імпульсної високочастотної напруги на зміну діелектричної характеристики біологічних тканин у моделі електрозварного міжкишкового анастомозу. *Медицина інформатика та інженерія*, **2**, 37–43.

References

1. (2009) *Tissue-saving high-frequency electric welding surgery. In: Atlas*. Ed. by B.E. Paton, O.N. Ivanova. Kiev, PWI, IEW [in Russian].
2. Paton, B.E., Krivtsun, I.V., Marinsky, G.S. et al. (2013) Welding, cutting and heat treatment of live tissues. *The Paton Welding J.*, **10-11**, 135–146.
3. Podpryatrov, S.E., Gichka, S.G., Podpryatrov, S.S. et al (2012) Structure of electric weld as a basis of the new development of surgery. *In: Proc. of 7th Int. Sci.-Pract. Conf. on Welding and Heat Treatment of Live Tissues. Theory. Practice. Prospects (Kiev, 30 November 2012)*. Ed. by G.S. Marinsky. Kiev, PWI.
4. (2018) *In: Proc. of 13th Int. Sci.-Pract. Conf. on Welding and Heat Treatment of Live Tissues. Theory. Practice. Prospects (Kiev, 30 November – 1 December 2018)*. Ed. by G.S. Marinsky. Kiev, PWI.
5. Nychytailo, M.Yu., Furmanov, Yu.O., Gutsulyak, A.I. et al. (2016) Formation of biliary-enteric and interintestinal anastomoses under the conditions of bile peritonitis using HF electric welding in the experiment. *Klinichna Khirurgiya*, **1**, 65–68 [in Ukrainian].
6. Marinsky, G.S., Chernets, O.V., Tkachenko, V.A. et al. (2016) Bench research of high-frequency electric welding of biological tissues. *The Paton Welding J.*, **12**, 41–45.
7. Marinsky, G.S., Podpryatrov, S.E. Chernets, O.V. et al. (2018) Investigation of high-frequency welding of biological tissues in the specialized experimental complex of the E.O.Paton Electric Welding Institute. *In: Proc. of 13th Int. Sci.-Pract.*

- Conf. on Welding and Heat Treatment of Live Tissues. Theory. Practice. Prospects* (Kiev, 30 November – 1 December 2018)). Ed. by G.S. Marinsky. Kiev, PWI, 63–67.
8. Lopatkina, K.G., Marinsky, G.S., Chernets, O.V. et al. (2015) Research complex for experimental studies of HF welding of different types of tissues. In: *Proc. of 10th Int. Sci.-Pract. Conf. on Welding and Heat Treatment of Live Tissues. Theory. Practice. Prospects* (Kiev, 27-28 November 2015. Ed. by G.S. Marinsky. Kiev, PWI, 40-41.
9. Podpryatov, S.S., Marinsky, G.S., Chernets, O.V. et al. (2018) Investigation of the influence of parameters of supplying pulsed high-frequency voltage on the change of dielectric characteristic of biological tissues in the model of electrically-welded interintestinal anastomosis. *Medychna Informatyka ta Inzheneriya*, **2**, 37–43 [in Ukrainian].

NEW ALGORITHMS OF HIGH-FREQUENCY WELDING OF BIOLOGICAL TISSUES*

G.S. Marynsky¹, K.G. Lopatkina¹, O.V. Chernets¹, S.E. Podpryatov^{1,2}, V.A. Tkachenko¹,
I.O. Belousov², V.A. Vasylenko¹

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

²Kyiv City Clinical Hospital № 1. 121 Kharkiv Highway, 02091, Kyiv, Ukraine. E-mail: KCRZ@ukr.net

Studies of the influence of new algorithms for welding biological tissues on the temperature parameters of the process in the weld zone and the biophysical and structural characteristics of the tissues being welded using the advanced control system of EKVZ-300 series apparatuses have been carried out. The effect of new experimental algorithms for high-frequency welding of biological tissues on the temperature parameters of the process and the characteristics of tissues of various types in the seam area was studied. 9 Ref., 6 Fig.

Keywords: high-frequency welding, biological tissues, EKVZ-300 «PATONMED» apparatus, welding algorithms, process temperature values, structural and biophysical changes in tissues, research complex

Надійшла до редакції 04.12.2020

ФАХОВІ ЖУРНАЛИ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА



Журнал «**Автоматичне зварювання**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень за напрямками: матеріалознавство та металургія зварювання, наплавлення та інших споріднених технологій; технології та матеріали для зварювання конструкційних матеріалів; виробництво зварних металоконструкцій для різних галузей промисловості; відновлювальний ремонт для подовження ресурсу зварних конструкцій і вузлів; проблеми міцності, конструювання та оптимізації зварних конструкцій; технології 3D друку, які базуються на зварювальних процесах; гібридні технології зварювання. В журналі публікується також інформація про нові зварювальні матеріали, джерела живлення та технології; звіти про виставки, конференції та семінари, анонси нових книг та винаходів, новини від відомих компаній та інше.



Журнал «**Сучасна електрометалургія**» є міжнародним науково-теоретичним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень у сферах: металургія чорних і кольорових металів та сплавів; спеціальна електрометалургія (електрошлакова, електронно-променева, плазмове- та вакуумно-дугова технології); нові матеріали; енерго- і ресурсозбереження; матеріалознавство, 3D технології у спеціальній електрометалургії. Публікується також допоміжна інформація з тематики журналу.



Журнал «**Технічна діагностика та неруйнівний контроль**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень з діагностики матеріалів і конструкцій та методи неруйнівного контролю для оцінки стану матеріалів і конструкцій; теорія, методи і засоби технічної діагностики. Розміщуються матеріали з моніторингу конструкцій та подовження ресурсу та працездатності засобами НК. Публікується супутня інформація з тематики журналу, а також інформація про події та новини в Українському товаристві НК та ТД.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.
Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.
Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм.
Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм.
Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм.
А5 – 185x130 мм.
Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.
Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥΚ, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

Ціна договірна. Передбачена система знижок. Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі. Публікується тільки профільна реклама з тематики журналів. Відносно вартості, знижок та термінів публікації прохання звертатися у видавництво.

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>

ВПЛИВ ТЕРМООБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ В1341 В УМОВАХ, ЩО МОДЕЛЮЮТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ

Л.І. Ниркова, Т.М. Лабур, С.О. Осадчук, М.Р. Яворська, В.А. Коваль

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

В роботі представлено результати порівняльних досліджень корозійно-механічної тривкості зварних з'єднань сплаву В1341 товщиною 1,2 мм, отриманих ручним аргнодуговим зварюванням вільною та стиснутою дугою, після різних видів термічного оброблення (ТО) – штучного старіння та повного циклу термооброблення (гартування та штучне старіння). Показано, що штучне старіння підвищує характеристики міцності зварних з'єднань: отриманих вільною дугою – на ~23 % порівняно з основним металом, стиснутою дугою – на ~29 %, але знижує відносне подовження на ~82 % і на ~84 %, а коефіцієнт міцності – до 0,77 й до 0,71 (0,81 та 0,83 у стані після зварювання), відповідно. Повний цикл ТО забезпечує підвищення як міцності, так і пластичності. Після штучного старіння, а також після повного циклу термооброблення різниця потенціалів між основним металом та зоною термічного впливу не перевищує допустиме значення, 0,05 В (згідно з ГОСТ 9.005), що при експлуатації в неагресивних середовищах не представлятиме небезпеку. Штучне старіння і повний цикл ТО не погіршує стійкість зварних з'єднань сплаву В1341Т проти розшаровуючої корозії порівняно із станом після зварювання, яка оцінена балом 2. Продemonстровано підвищення опірності міжкристалітній корозії (МКК) після штучного старіння, максимальна глибина якої становила 0,301 мм для з'єднання, отриманого вільною дугою, і 0,233 мм – стиснутою дугою (у стані після зварювання – 0,350 та 0,47 мм). Після повного циклу ТО глибина МКК складала 0,287 та 0,345 мм, відповідно. Штучне старіння знижує корозійно-механічну тривкість зварних з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою: час руйнування зразків становив 9 та 12 діб, відповідно (порівняно із станом після зварювання – 45 діб), але після повного циклу ТО максимальний час руйнування зварних з'єднань підвищився до 54 і 31 діб, відповідно. Вищу корозійно-механічну тривкість після повного циклу термооброблення мали зварні з'єднання, отримані стиснутою дугою. Бібліогр. 14, табл. 5, рис. 7.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, зварні з'єднання, отримані вільною та стиснутою дугою, механічні властивості, структура, міжкристалітна корозія, розшаровуюча корозія, корозія при постійній деформації, потенціометрія, вольтамперометрія.

Алюмінієві сплави системи легування Al–Mg–Si–Cu поєднують широкий комплекс властивостей: високу технологічність, міцність, зварюваність та корозійну тривкість [1, 2]. Тонколистовий сплав В1341 з цієї групи широко застосовується для виготовлення балонів різних конструкцій для зберігання рідких речовин [3]. Під час виготовлення таких емкостей їх окремі елементи з'єднуються з ручним аргнодуговим зварюванням неплавким електродом вільною або стиснутою дугою [1, 2, 4]. Однак процес зварювання вільною дугою відбувається за умови її низької проплавляючої здатності при формуванні шва [2]. Застосування зварювання стиснутою дугою покращує форму шва та сприяє зменшенню втрати міцності з'єднання після зварювання [1]. Оскільки термічний цикл зварювання неплавким електродом викликає зниження міцності зварного з'єднання, перед експлуатацією виробів виконують їх термічне оброблення.

Дослідженню впливу операцій термооброблення на зміну властивостей алюмінієвих спла-

вів присвячено багато досліджень, але вони переважно вивчають поведінку основного металу [5, 6]. Оскільки стан металу після зварювання для кожної товщини напівфабрикату є унікальним за структурою матеріалу, а в літературі таких даних недостатньо, метою даної роботи було встановлення впливу різних режимів термооброблення на комплекс експлуатаційних властивостей зварних з'єднань тонколистового алюмінієвого сплаву В1341Т ($\delta = 1,2$ мм), отриманих аргнодуговим зварюванням вільною та стиснутою дугою.

Ця стаття є продовженням серії експериментальних досліджень, результати яких викладені у роботах [7–10].

Методика експериментів. Дослідження проводили на зварних з'єднаннях алюмінієвого сплаву марки В1341 такого хімічного складу (спектральний аналіз виконано на спектрометрі ДФС-36), мас. %: Al – основа, (0,45...0,9) Mg, (0,5...1,2) Si, (0,15...0,35) Mn, (0,1...0,5) Cu, (0,05...0,1) Ca, 0,25 Cr, 0,2 Zn, 0,15 Ti, 0,5 Fe, інші елементи не більше 0,1. Для зварювання сплаву застосовували

Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>, Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>, Осадчук С.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>, Яворська М.Р. – <https://orcid.org/0000-0003-2016-6289>, Коваль В.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5154-1446>

© Л.І. Ниркова, Т.М. Лабур, С.О. Осадчук, М.Р. Яворська, В.А. Коваль, 2021

дріт марки Св2117 діаметром 2 мм. Технологічні аспекти зварювання детально обговорено у попередніх роботах [7–9, 8, 9]. В даній роботі досліджували зварні з'єднання, зварені вздовж напрямку прокату. Схема проведення досліджень з'єднань та застосовані режими їх термооброблення представлені на рис. 1.

Особливості структурних перетворень у зварних з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою, вивчали на металографічних шліфах, вирізаних перпендикулярно до осі швів. Шліфи готували за стандартною методикою, а мікроструктуру виявляли електролітичним травленням у розчині складу: 930 мл CH_3COOH + 70 мл HClO_4 .

Електрохімічні дослідження проводили у розчині 3%-го NaCl методами потенціометрії та вольтамперометрії, застосовуючи потенціостат ПИ-50-1.1 та програматор Пр-8. Характер розподілу потенціалів по поверхні зварного з'єднання вивчали методом вимірювання потенціалу під краплею за методикою ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Для отримання поляризаційних кривих використовували притиску електрохімічну комірку. Робочим електродом слугували окремі зони зварного з'єднання, електродом порівняння – насичений хлорид-срібний електрод ЭВЛ-1М1, допоміжним – платиновий електрод. Швидкість розгортки потенціалу в потенціодинамічному режимі становила $5 \cdot 10^{-4}$ В/с. Перед зняттям поляризаційних

кривих поверхню зразків готували за стандартною методикою.

Опірність міжкристалітній (МКК), розшаровуючій корозії та корозійному розтріскуванню оцінювали відповідно до вимог ГОСТ 9.021 [11], ГОСТ 9.904 [12], ГОСТ 9.019 [13]. Випробування на корозійне розтріскування проводили за умови постійного осьового розтягуючого напруження в металі на рівні 160 МПа при повному зануренні зразків зварних з'єднань у розчин 3 % NaCl на установці «Сигнал» впродовж не менше ніж 45 діб. Зварний шов був розташований перпендикулярно напрямку дії напруження розтягу.

Результати та їх обговорення.

Макро- та мікроструктура зварних з'єднань. На рис. 2 і 3 представлено макро- та мікроструктури основного металу сплаву В1341Т та його зварних з'єднань, отриманих в залежності від способу зварювання та виду застосованого термооброблення. Коефіцієнт форми шва зварного з'єднання, отриманого стиснутою дугою, приблизно на 4 % більше, порівняно зі зварним з'єднанням, отриманим вільною дугою (2,52 та 2,43, відповідно) [9].

При аналізі мікроструктури зварних з'єднань сплаву В1341Т в стані природного старіння було встановлено, що в умовах дії термічного циклу зварювання незалежно від виду дуги відбувається розпад пересиченого твердого розчину та розчинення зміцнюючих фаз. Кристалізація розплавлення металу швів при охолодженні супроводжується виділенням вторинних фаз та коагуляцією нерозчинних фаз (рис. 3, а). Це зумовлено значною кількістю основних легуючих елементів і домішок, які входять до складу сплаву [3]. Згідно з діаграмою стану системи Al-Mg-Si-Cu-Fe в рівновазі з твердим розчином у сплаві можуть знаходитися подвійні фази: Mg_2Si , SiCuAl_2 , FeAl_3 , Mg_5Al_8 , а також потрібні фази CuFeAl_5 , CuMgAl_2 , FeSiAl_5 , FeMg_3Si_6 . В процесі кристалізації швів вони утворюють таку ж кількість

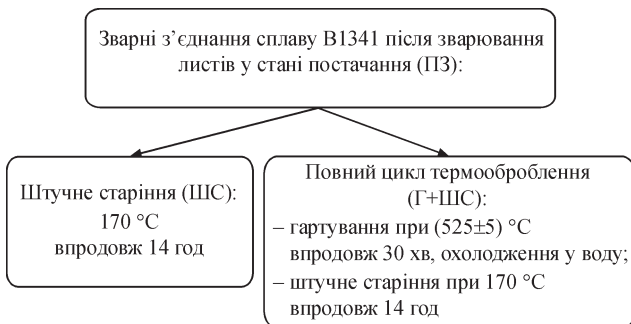


Рис. 1. Схема проведення досліджень з'єднань сплаву В1341Т та застосовані режими їх термічного оброблення

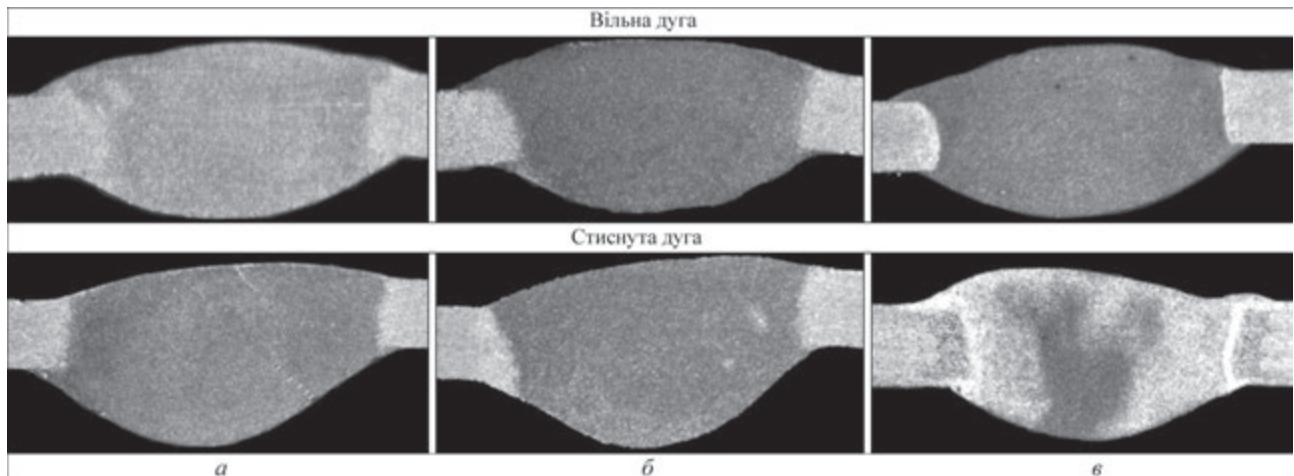


Рис. 2. Макрошліфи зварних з'єднань сплаву В1341, отриманих вільною та стиснутою дугою, у різних станах: а – у стані після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

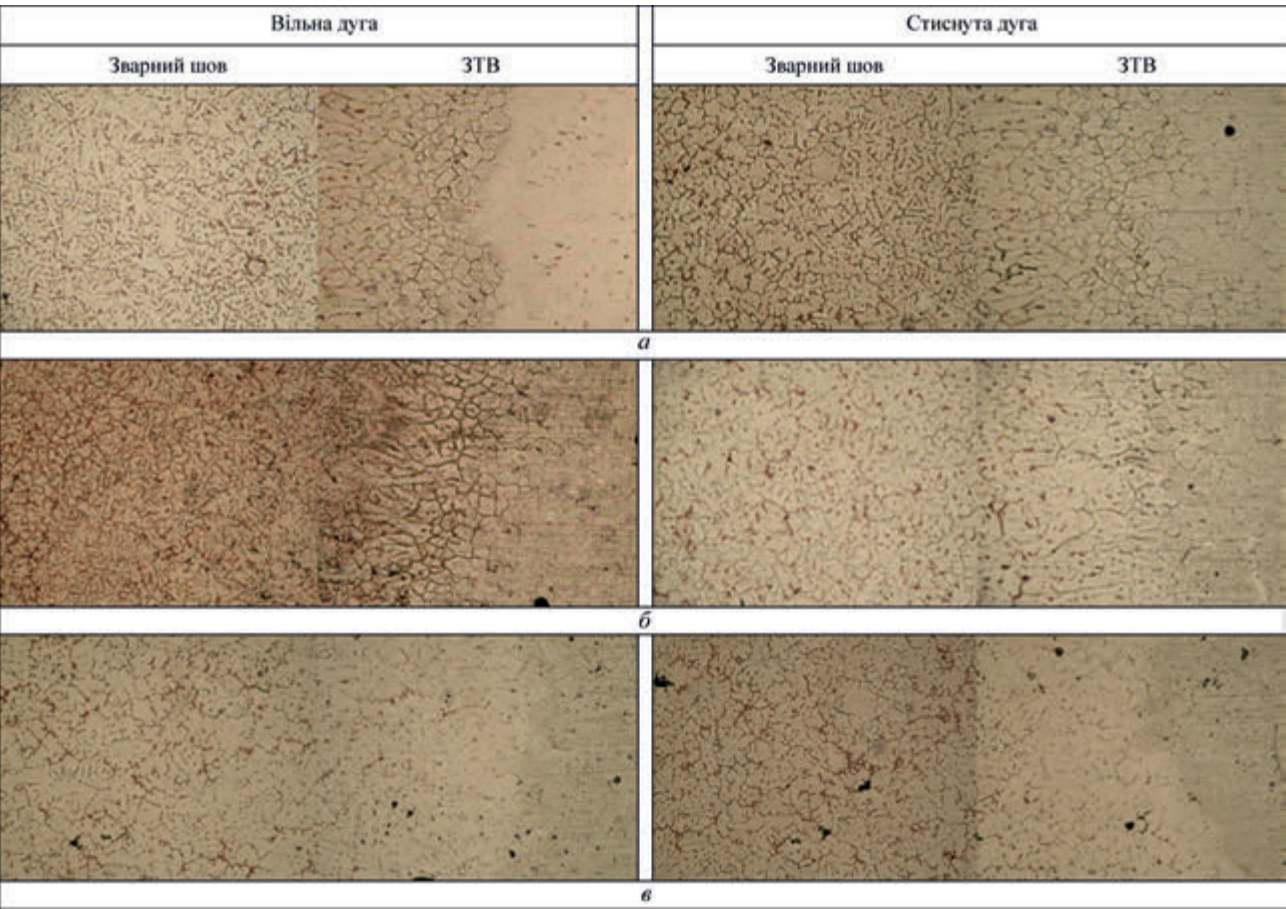


Рис. 3. Мікроструктура ($\times 320$) зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих стиснутою та вільною дугою, у різних станах: а – у стані після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

метастабільних фаз, які розташовані рівномірно, але відрізняються формою та геометричними розмірами. Характерною їх ознакою є нестабільність розпаду в межах одного зерна [3]. Граничні ділянки кристалітів при цьому збагачуються легуючими елементами, а об'єм – збіднюється, а вздовж границь утворюються тонкі евтектичні прошарки.

Мікроструктура зони сплавлення шва з основним металом має оплавлені границі зерен, які утворилися за умов дії зварювального нагрівання. В результаті контактного плавлення зерен між собою або з евтектичною фазою Mg_2Si , яка розташована вздовж границь зерен, відбувається їх потовщення. Швидке відведення дуги, кристалізація металу та формування швів викликають біля границі сплавлення шва з основним металом утворення стовбчастих кристалів, які зорієнтовані перпендикулярно напрямку вектора переміщення дуги (рис. 3, б). З боку основного металу в зоні сплавлення при цьому відбувається розпад пересиченого твердого розчину та одночасне розчинення раніше утворених зміцнюючих фаз і виділення вторинних фаз. Також відбувається коагуляція нерозчинних інтерметалідних фаз заліза та кремнію, які потрапляють в метал на етапі металургійного виробництва сплаву та можуть викликати збільшення напруження в структурі [1].

На ділянці ЗТВ з'єднань сплаву В1341Т спостерігається зростання розмірів зерна та коагуляція включень нерозчинних фаз, повне або часткове зниження ефекту зміцнення після природного старіння, а також локальний відпал і гартування окремих структурних складових ділянок (рис. 3, в). Взаємодія приграничних включень інтерметалідів з твердим розчином при цьому викликає утворення вздовж границь зерен ділянок з рідкими прошарками легкоплавких евтектик. Це зумовлено особливостями структурних і фазових перетворень у металі під дією термічного циклу зварювання дугою.

Проведення операції штучного старіння зразків з'єднань викликає зростання об'ємної долі вторинних фаз та їх щільності в структурі швів (рис. 3, а, б). Процес супроводжується потовщенням границь зерен внаслідок їх контактного сплавлення між собою або з евтектичною фазою Mg_2Si , розташованою біля границь зерен. Зазначені трансформації мікроструктури відбуваються як результат розпаду твердого розчину, дисперсного твердіння фаз, що підвищує міцність металу зварних з'єднань (табл. 1).

Виконання повного циклу термічної обробки з'єднань (гартування та штучного старіння) призводить до зміни розмірів зерен, ширини прошарків між ними, наявності в структурі вторинних

Таблиця 1. Механічні властивості основного металу та зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, після термооброблення за різними режимами

Стан зразків	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	α , град.	Коефіцієнт міцності ЗЗ	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	α , град.	Коефіцієнт міцності ЗЗ
	Зварне з'єднання, отримане вільною дугою					Зварне з'єднання, отримане стиснутою дугою				
Після зварювання (ПЗ)	<u>195,0</u> 250,5	<u>130,1</u> 187,6	<u>2,6</u> 18,9	<u>56</u> 180	0,83	<u>200,3</u> 250,5	<u>144,3</u> 187,6	<u>1,7</u> 18,9	<u>66</u> 180	0,81
Після штучного старіння (ШС)	<u>257,6</u> 335,7	<u>215,5</u> 313,3	<u>1,9</u> 10,7	<u>30</u> 180	0,76	<u>258,7</u> 335,7	<u>204,0</u> 313,3	<u>1,7</u> 10,7	<u>46</u> 180	0,77
Після гартування та штучного старіння (Г + ШС)	<u>241,5</u> 321,1	<u>288,6</u> 282,0	<u>6,9</u> 10,7	<u>35</u> 158	0,75	<u>323,0</u> 321,1	<u>294,3</u> 282,0	<u>3,3</u> 10,7	<u>43</u> 158	1,00

Примітка. Значення показників зварних з'єднань у відповідному стані подані в чисельнику, основного металу – в знаменнику.

фазових включень тощо (рис. 3, а). Виділення додаткових вторинних фазових включень та рівномірний характер їх розподілу по всьому об'єму швів позитивно проявляється на механічних властивостях зварних з'єднань (табл. 1). На границі сплавлення шва з основним металом відмічається утворення більш тонких границь структурних складових (рис. 3, в). Їх пов'язують з наявністю в сплаві незначних добавок міді (0,3 %), що за даними роботи [3] обмежує швидкість виділення зон Гінье-Престона, які знаходяться в метастабільній рівновазі з твердим розчином. Морфологія фазових виділень з матриці має однорідний характер, а розміри фаз дисперсні. Це визначає швидка фіксація структурних складових при гартуванні зразків з'єднань у воді. Проведення вслід гартування операції штучного старіння дозволяє зберегти морфологію розташування структурних складових, форму та дисперсні розміри фазових включень. На окремих ділянках відмічається потовщення границь кристалітів швів та зерен основного металу в зоні сплавлення з основним металом. Загальна їх товщина менша, ніж в структурі зварних з'єднань після штучного старіння (рис. 3).

Як було зазначено вище, структурні трансформації, які відбуваються у сплаві В1341Т під час зварювання вільною та стиснутою дугою та подальшого термооброблення зварних з'єднань, впливають на показники їх механічних властивостей (табл. 1). Згідно отриманих даних, міцність з'єднань, зварених вільною або стиснутою дугою, дорівнює 195,0 та 200,3 МПа, що на 22 та 20 % менше ніж міцність основного металу. Коефіцієнти міцності з'єднань, відповідно, становить 0,83 та 0,81. Межа плинності зварних зразків порівняно з основним металом також зменшується на 30 та 23 % (табл. 1). Відзначимо, що технологія зварювання сильніше впливає на рівень показників пластичності, а саме: відносне подовження та кут згину знижуються на 86 та 91 %, на 70 та 63 %, відповідно.

Після штучного старіння характеристики міцності зварних з'єднань зростають порівняно зі

станом після зварювання. При застосуванні вільної дуги міцність становить 257,6 МПа, що на ~23 % менше, ніж основного металу в такому ж стані, а стиснутої дуги – 258,7 МПа (на ~29 %). Водночас, спостерігається зниження коефіцієнта міцності до рівня 0,76 та 0,77. Межа плинності також зростає, однак її чисельні значення залишаються меншими порівняно з основним металом: на ~31 %, для з'єднань, отриманих вільною дугою, і на ~35 %, для з'єднань, отриманих стиснутою дугою (табл. 1). Проведення операції штучного старіння викликає подальше зниження показників пластичності (кута згину та відносного подовження), відповідно, на ~83 та ~82 %, для з'єднання, отриманого вільною дугою, і на ~74 та ~84 %, для з'єднання, отриманого стиснутою дугою (табл. 1).

Виконання операції повного циклу термооброблення викликає порівняно з основним металом зростання на 25 % міцності з'єднань, отриманих вільною дугою (до 241,5 МПа). У з'єднаннях, отриманих стиснутою дугою, міцність підвищилася до 323,0 МПа майже до рівня основного металу (321,1 МПа). Величина коефіцієнту міцності з'єднань становила 0,75 та 1,0 %, відповідно. Позитивний вплив цього режиму термооброблення спостерігали на значеннях межі плинності, яка зросла та навіть трохи перевищила рівень основного металу і становила 288,6 та 294,3 МПа для з'єднань, отриманих вільною і стиснутою дугою. Також спостерігалось підвищення рівня відносного подовження з'єднань до 6,9 та 3,3 % (табл. 1). Водночас рівень кута згину був меншим порівняно зі станом після зварювання і майже таким самим порівняно із зразками у стані після штучного старіння, 35 % (для вільної дуги) та 43 % (для стиснутої дуги).

Отже, після повного циклу ТО у зразках зварних з'єднань, отриманих стиснутою дугою, встановлено підвищення характеристик міцності до рівня основного металу що, імовірно, обумовлено зменшенням електрохімічної гетерогенності структури з'єднань внаслідок утворення дрібнозернистої структури та зменшенню ширини зони

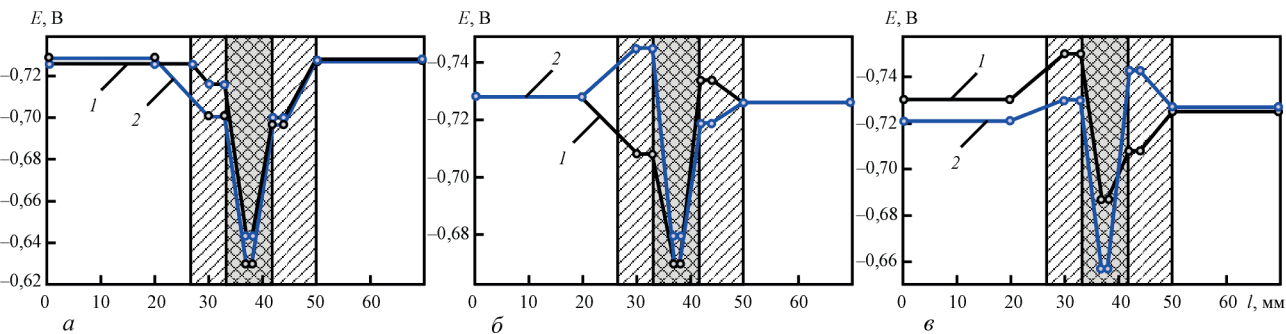


Рис. 4. Характер розподілу електрохімічних потенціалів під краплею у різних зонах зварних з’єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною (1) та стиснутою (2) дугою, а також у різних станах: а – після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

Таблиця 2. Різниця потенціалів між зонами зварного з’єднання сплаву В1341Т у різних станах

Різниця потенціалів між зонами зварного з’єднання, В	Стан зварного з’єднання					
	Вільна дуга			Стиснута дуга		
	ПЗ	ШС	Г+ШС	ПЗ	ШС	Г+ШС
Основний метал – зварний шов	0,099	0,042	0,041	0,117	0,066	0,044
Основний метал – зона термічного впливу	0,030	0,015	0,010	0,068	0,013	0,032

термічного впливу під дією більш концентрованої енергії дуги завдяки її стисканню аргонем [1].

Електрохімічні дослідження. Вимірювання потенціалів корозії у досліджуваних зразках показало, що різниця потенціалів між основним металом та зварним швом для зварних з’єднань у стані постачання становить $\sim 0,099$ В (вільна дуга) та $\sim 0,117$ В (стиснута дуга) (рис. 4, табл. 2). Обидва види термічного оброблення, застосовані після зварювання, зменшують зазначену різницю, яка після штучного старіння становила $\sim 0,042$ В (вільна дуга) та $\sim 0,066$ В (стиснута дуга), після повного циклу термооброблення – $\sim 0,041$ В (вільна дуга) та $\sim 0,044$ В (стиснута дуга). Різниця потенціалів між основним металом та ЗТВ для зварних з’єднань у стані постачання була меншою порівняно зі зварним швом та дорівнювала $\sim 0,030$ В (вільна дуга) та $\sim 0,068$ В (стиснута дуга). Після виконання термооброблення зразків різниця потенціалів між основним металом та ЗТВ ще зменшилася, а саме, після штучного старіння вона становила $\sim 0,015$ В (вільна дуга) та $\sim 0,013$ В (стиснута дуга), а після повного ци-

клу термооброблення – $\sim 0,010$ В (вільна дуга) та $\sim 0,032$ В (стиснута дуга).

Таким чином, операції термооброблення зразків зменшують різницю потенціалів між основним металом та зоною термічного впливу до допустимих значень, крім з’єднань, зварених вільною дугою, у стані після штучного старіння. Різниця потенціалів між основним металом та зоною термічного впливу після обох застосованих видів термооброблення не перевищувала допустимий рівень (0,05 В) згідно з ГОСТ 9.005 [14].

Поляризаційні криві основного металу та зварного шва з’єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою, у різних станах представлені на рис. 5. З їх аналізу встановлено, що струм анодного розчинення (за потенціалу $-0,6$ В) на зварному шві зразків обох зварних з’єднань у стані після зварювання (рис. 5, криві 2, 3) більше, ніж на основному металі: $1,07$ А/м² (вільна дуга), $3,37$ А/м² (стиснута дуга) та $0,03$ А/м² – основний метал (табл. 3).

Термооброблення за режимом штучного старіння зменшує анодні струми на зварному шві, які становили, відповідно, $1,09$, $1,09$ та $0,015$ А/м² (табл. 3).

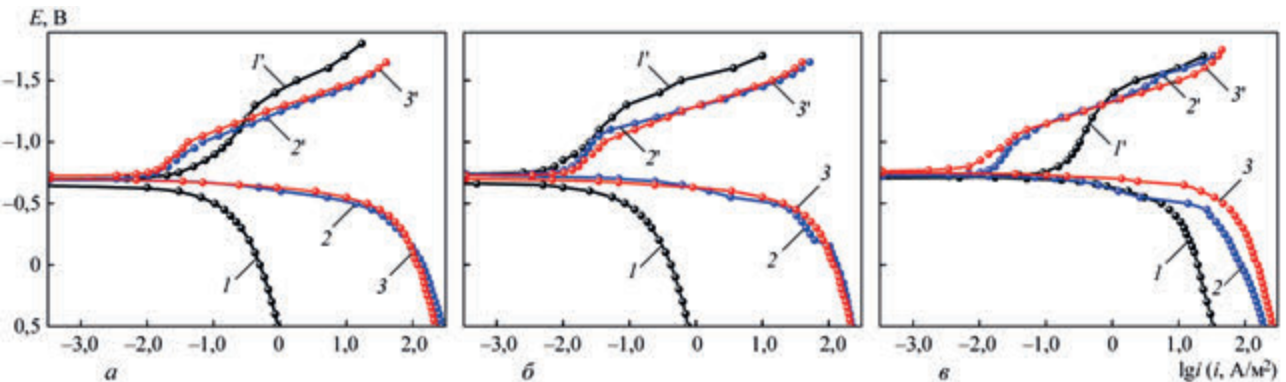


Рис. 5. Анодні (1, 2, 3) та катодні (1', 2', 3') поляризаційні криві основного металу (1, 1') та зварних з’єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною дугою (2, 2') та стиснутою дугою (3, 3') у різних станах: а – після зварювання; б – після штучного старіння; в – після гартування та штучного старіння

Таблиця 3. Електрохімічні характеристики основного металу та шва зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, у розчині 3 % NaCl

Характеристика зразка	Стан зразка	E_{cor} , В	i_a , А/м ²	i_d , А/м ²	E_{H_2} , В
ОМ	У стані постачання (природного старіння)	-0,728	0,03	2,95	-1,38
	ШС	-0,724	0,015	0,026	-1,32
	Г+ШС	-0,715	1,79	0,33	-1,42
ЗЗ, отримане вільною дугою	Після зварювання	-0,699	1,07	0,023	-0,99
	ШС	-0,726	1,09	0,023	-1,06
	Г+ШС	-0,729	1,80	0,026	-0,99
ЗЗ, отримане стиснутою дугою	Після зварювання	-0,708	3,37	0,016	-1,05
	ШС	-0,736	1,09	0,022	-1,0
	Г+ШС	-0,737	21,88	0,02	-1,07

Примітки. i_a – струм анодного розчинення за потенціалу -0,6 В; i_d – граничний дифузійний струм; E_{cor} – потенціал корозії; E_{H_2} – потенціал виділення водню.

Після повного циклу термооброблення різниця між струмом анодного розчинення основного металу та зварних швів струмів анодного розчинення складала 1,79 А/м² для основного металу, 1,80 та 21,88 А/м² – для з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою, відповідно. Катодні криві зварних швів у стані після зварювання зміщуються в область менших струмів порівняно з основним металом (рис. 5, а). Граничний дифузійний струм на зварних швах обох досліджуваних способів з'єднання сплаву В1341Т менше (0,023 та 0,016 А/м²), ніж на основному металі (2,95 А/м²), що може вказує на гальмування катодного процесу в металі швів (табл. 3).

Після штучного старіння спостерігається незначне збільшення граничного дифузійного струму у металі зварних швів обох з'єднань порівняно із станом після зварювання (0,023 А/м² (вільна дуга), 0,022 А/м² – стиснута дуга, 0,0263 А/м² – основний метал) (рис. 5, б, криві 2', 3'). Внаслідок цього проявляється тенденція до активізації корозійного процесу в даній області на поляризаційній кривій. Повний цикл термооброблення з'єднань суттєво гальмує корозійний процес у швах, що виявляється у зменшенні значень граничного дифузійного струму до 0,026 А/м² (вільна дуга), 0,0202 А/м² (стиснута дуга) порівняно з основним металом (0,33 А/м²) (рис. 5, в, криві 2', 3') (табл. 3). Слід зауважити, що суттєвої різниці корозійної поведінки металу зварних швів у з'єднаннях, отриманих вільною та стиснутою дугою, не виявлено. Оскільки, як свідчить характер поляризаційних кривих, у водних середовищах корозія сплаву В1341Т відбувається з дифузійним контролем, то швидкість корозії можна оцінювати за значеннями граничного дифузійного струму [14].

Таким чином, встановлено, що проведення термооброблення зварних з'єднань сплаву В1341Т за режимом штучного старіння сприяє незначному підвищенню швидкості корозії, але разом з тим знижує потенціал виділення водню з металу ЗТВ обох досліджуваних способів зварювання по-

рівняно з основним металом. Виконання повного циклу термооброблення зменшує граничний дифузійний струм і потенціал виділення водню на зварних швах незалежно від способу зварювання порівняно з основним металом. Можна очікувати, що за таким режимом ТО буде зростати корозійна тривкість металу зварних з'єднань сплаву.

Тривкість проти міжкристалітної корозії (МКК). Максимальна глибина МКК основного металу у стані постачання становить 0,086 мм. Осередки міжкристалітного руйнування зварних з'єднань, отриманих вільною дугою, відмічаються в ЗТВ та розвинулися на глибину 0,350 мм (табл. 4), а стиснутою дугою – в зоні сплавлення та ЗВТ (рис. 6, а), на глибину 0,506 мм. Штучне старіння зразків з'єднань викликало незначне підвищення чутливості металу до МКК: міжкристалітні тріщини розповсюдилися в ЗТВ з'єднань, отриманих вільною дугою (рис. 6, б), на максимальну глибину 0,301 мм, а стиснутою дугою – на 0,233 мм. Після повного циклу ТО міжкристалітні тріщини утворилися як в ЗТВ, так і по зоні сплавлення обох зварних з'єднань (рис. 6, в), глибина МКК становила 0,287 та 0,345 (0,533) мм відповідно (табл. 5).

Таким чином, зварювання тонколистового сплаву В1341 товщиною 1,2 мм стиснутою дугою викликає зниження стійкості металу зварних з'єднань проти МКК, але вдало підібраний режим термооброблення може забезпечити зростання їх опірності міжкристалітному руйнуванню.

Стійкість проти розширюючої корозії. Аналіз поверхні зразків зварних з'єднань, отриманих вільною дугою (у стані після зварювання) виявив осередки відшарування діаметром майже 1 мм, сукупною площею не більше 1 %. Інших показників, які відображають зміну зовнішнього вигляду поверхні досліджуваних зразків, не виявлено (табл. 5.) Основним характерним показником, що змінює властивості з'єднань після штучного старіння або повного циклу термоо-

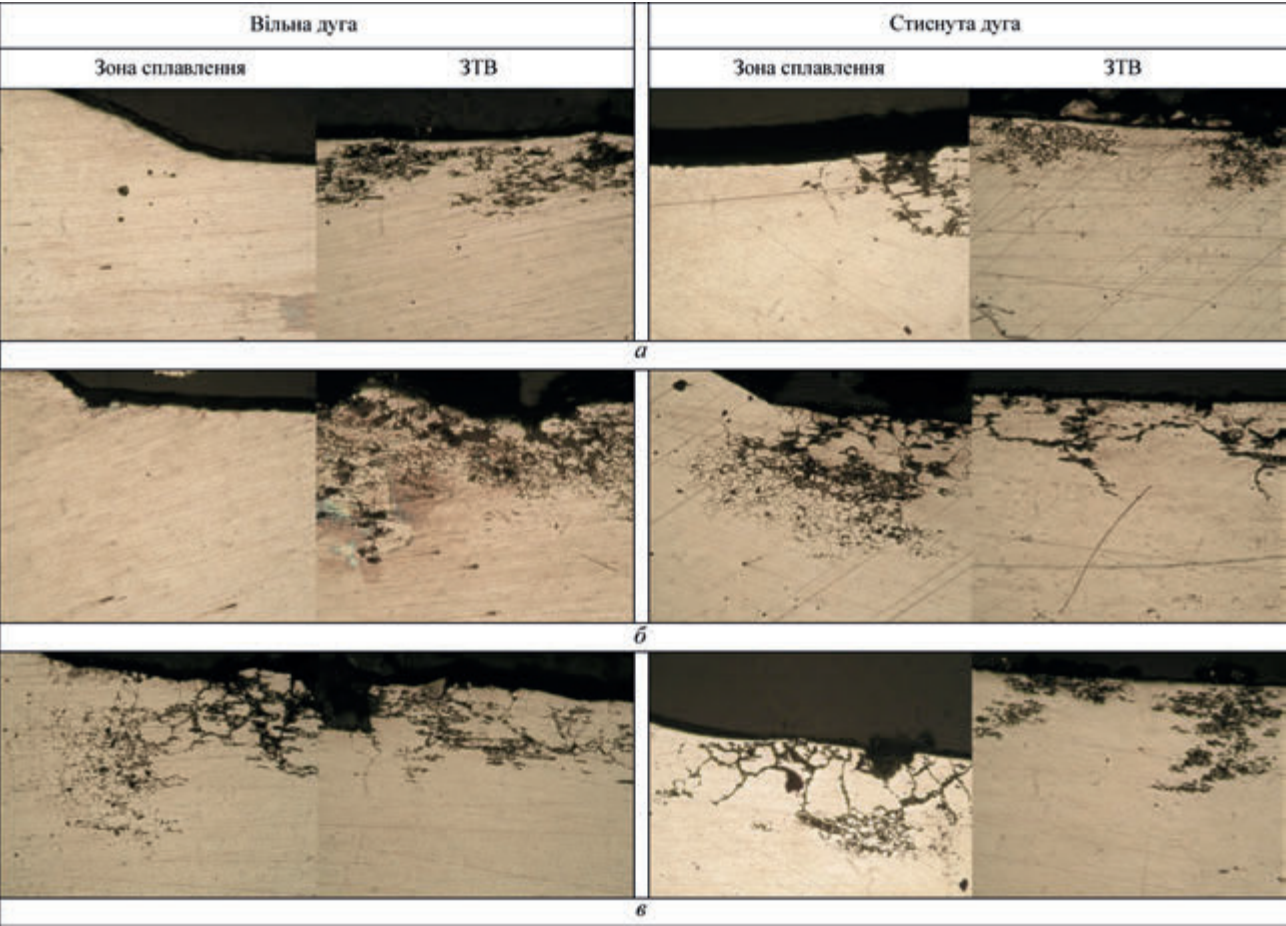


Рис. 6. Вигляд зразків в зоні сплавлення та ЗТВ зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих стиснутою та вільною дугою, у різних станах, після випробувань тривкості проти міжкристалітної корозії, $\times 320$: а – після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

броблення, було потемніння поверхні. Стійкість проти розшаровуючої корозії оцінено балом 2. У зварних з'єднаннях, виконаних стиснутою дугою, значення стійкості проти розшаровуючої корозії у стані після зварювання оцінено балом 1, оскільки не виявлено будь-яких змін на поверхні та по торцях зразків. Після штучного старіння або повного циклу термооброблення з'єднань спостерігається зміна кольору поверхні зразків. Їх тривкість проти розшаровуючої корозії також оцінено балом 2 згідно з ГОСТ 9.904. Отже, після термооброблення єдиним показником, який свідчив про зміну властивостей зразків обох видів зварних з'єднань, відзначено зміну кольору поверхні, а тривкість проти розшаровуючої корозії оцінено балом 2.

Опірність корозійному розтріскуванню. Зовнішній вигляд зразків після випробувань тривкості корозійно-механічному розтріскуванню представлено на рис. 7. Як свідчить візуальний

Таблиця 4. Узагальнені результати оцінювання корозійно-механічної тривкості зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих за різними технологіями зварювання неплавким електродом

Характеристика зразків	Стан зразків	Глибина МКК, мм	Стійкість проти розшаровуючої корозії, бал	Час руйнування, доби
Основний метал	У стані постачання	0,082...0,086	2...3	67...88
	Після штучного старіння	0,074...0,117	2...3	47...77
	Після гартування та штучного старіння	0,111...0,209	2...3	45...87
ЗЗ, отримане вільною дугою	У стані після зварювання	0,245...0,350	2...3	10...45
	Після штучного старіння	0,123...0,301	2...3	3...9
	Після гартування та штучного старіння	0,214...0,287	2...3	4...54
ЗЗ, отримане стиснутою дугою	У стані після зварювання	0,289...0,467	2...3	9...> 45
	Після штучного старіння	0,062...0,233	2...3	9...12
	Після гартування та штучного старіння	0,074...0,345	2...3	9...31

Таблиця 5. Результати оцінювання стійкості проти розширюючої корозії зварних з’єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, у різних станах

Характеристика зразків	Назва показників								Значення показників, бал
	Характер зміни зовнішнього вигляду зразків	Найбільший діаметр відшарування, мм	Площа відшарування на кожній поверхні, %		Сумарна довжина торців з тріщинами, мм				
			А	Б	1	2	3	4	
Зварні з'єднання, отримані вільною дугою									
ПЗ	Відшарування	<1,0	<1,0	<1,0	0	0	0	0	2-3
ШС	Потемніння поверхні	0	0	0	0	0	0	0	2
Г+ШС	Потемніння поверхні	0	0	0	0	0	0	0	2
Зварні з'єднання, отримані стиснутою дугою									
ПЗ	Без змін	0	0	0	0	0	0	0	1
ШС	Потемніння поверхні	0	0	0	0	0	0	0	2
Г+ШС	Потемніння поверхні	0	0	0	0	0	0	0	2

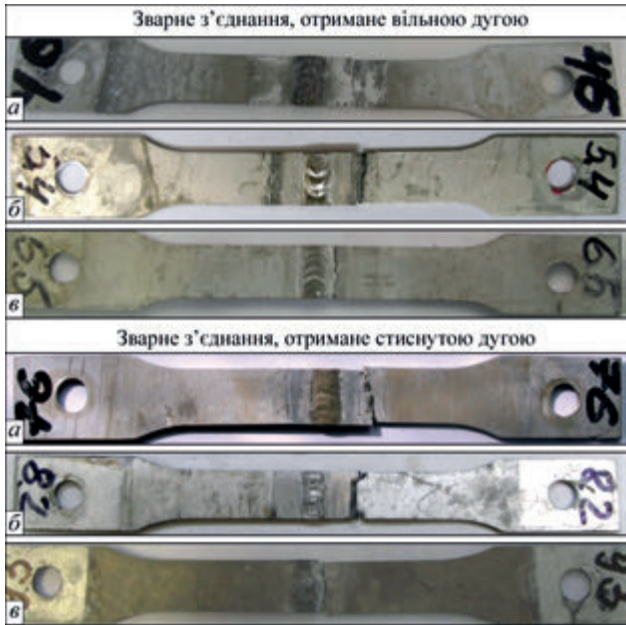


Рис. 7. Зовнішній вигляд зразків зварних з’єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, після випробувань стійкості проти корозійного розтріскування: а – у стані після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

аналіз зразків у стані після зварювання та штучного старіння, вони зруйнувалися по основному металу в ЗТВ на відстані 4...5 мм, а після проведення повного термооброблення зразків – біля зони сплавлення шва з основним металом. Час руйнування зварних з’єднань, отриманих вільною дугою, зменшився до 10...45 діб (у середньому 20 діб) порівняно з основним металом, який становив від 67 до 88 діб (майже 73 діб) (табл. 4).

Аналогічні результати отримані для з’єднань, зварених стиснутою дугою. Після штучного старіння проміжок часу до повного руйнування зразків був найменшим для обох досліджуваних способів з’єднання сплаву В1341Т. Для з’єднань, отриманих вільною дугою, руйнування відбувалося протягом 3...9 діб, а отриманих стиснутою дугою – 9...12 діб. Після повного циклу термооброблення максимальна тривалість до руйнування основного металу становила 87 діб, зварних з’єднань – 54 і 31 діб, відповідно.

Отже, термооброблення за режимом гартування та штучне старіння підвищує корозійно-механічну тривкість зварних з’єднань, отриманих як вільною, так і стиснутою дугою. Водночас, показники механічних властивостей після виконання повного термооброблення вищі для з’єднань, отриманих стиснутою дугою. Найвищий рівень корозійно-механічної тривкості в результаті проведення повного циклу термооброблення досягається у зразках зварних з’єднань, отриманих стиснутою дугою.

Висновки

1. Проведення операції штучного старіння підвищує характеристики міцності зварних з’єднань: отриманих вільною дугою до 257,6 МПа (на ~23 % порівняно з основним металом), стиснутою дугою – до 258,7 МПа (на ~29 %). Але при цьому відмічається зниження коефіцієнта міцності з’єднань до 0,76 і до 0,77 (0,81 і 0,83 у стані після зварювання). Показник відносного подовження зразків знижується на ~82 %, для з’єднання, отриманого вільною дугою, та на ~84 %, для з’єднання, отриманого стиснутою дугою. Виконання повного циклу термооброблення забезпечує зростання як показників міцності, так і пластичності. Значення межі міцності з’єднань, отриманих вільною дугою, зросла на ~25 % порівняно з основним металом у стані, а з’єднань, отриманих стиснутою дугою, підвищилися до рівня основного металу. Коефіцієнти міцності з’єднань становили 0,75 та 1,0, відповідно. Також підвищився показник відносного подовження до рівня 6,9 і 3,3 %, відповідно.

2. За результатами електрохімічних досліджень визначено, що після термооброблення, як за режимом штучного старіння, так і після повного циклу термооброблення, різниця потенціалів між основним металом та зоною термічного впливу не перевищувала допустиме значення (0,05 В) згідно з ГОСТ 9.005, що за умов експлуатації виробів зі сплаву В1341Т в неагресивних середовищах не представлятиме небезпеку.

3. Термооброблення за режимом штучного старіння сприяє незначному підвищенню граничного дифузійного струму (швидкості корозії) зварних з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою, але разом з тим зменшує потенціал виділення водню на зварних швах цих з'єднань порівняно з основним металом. Повний цикл термооброблення зменшує граничний дифузійний струм і потенціал виділення водню на зварних швах, отриманих за обох технологій з'єднання сплаву В1341Т, що свідчить про підвищення корозійної стійкості зварних швів.

4. Встановлено, що проведення штучного старіння або повного циклу термооброблення зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, не погіршує їх стійкість проти розшаровуючої корозії, яка оцінена балом 2.

5. Виконання штучного старіння покращує опірність міжкристалітній корозії сплаву В1341Т та його з'єднань: тріщини розвиваються в зоні термічного впливу з'єднання, отриманого вільною дугою, на максимальну глибину 0,301 мм, стиснутою дугою – на 0,233 мм (у стані після зварювання – 0,350 та 0,47 мм). Після проведення повного циклу ТО глибина міжкристалітних тріщин становить 0,287 та 0,345 (0,533) мм, відповідно.

6. Термооброблення за режимом штучного старіння знижує корозійно-механічну тривкість зварних з'єднань, отриманих вільною або стиснутою дугою: тривалість до руйнування зразків знижується до 9 та 12 діб, відповідно (порівняно із станом після зварювання – 45 діб). Після повного циклу термооброблення максимальний час до руйнування зварних з'єднань зростає до 54 і 31 діб, відповідно. Вищу корозійно-механічну тривкість після виконання повного циклу термооброблення продемонстрували зразки зварних з'єднань, отриманих стиснутою дугою.

Робота виконана за підтримки НАН України в рамках програми відомчого замовлення Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона в 2017–2021 рр. (номер державної реєстрації 0117U001188).

Список літератури

1. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Київ, Наукова думка.
2. Кривов Г.А., Рябов В.Р., Ищенко А.Я. и др. (1998) *Сварка в самолетостроении*. МИИВЦ.
3. Овчинников В.В., Грушко О.Е. (2005) Высокотехнологичный свариваемый алюминиевый сплав В1341 системы Al–Mg–Si. *Машиностроение и инженерное образование*, 3, 4, 2–11.
4. Albert, D. (1993) Aluminium alloys in arc welded constructions. *Welding World Magazine*, 32, 3, 97–114.
5. Pogatscher, S., Antrekowitsch, H., Leitner, H. et al. (2013) Influence of the thermal route on the peak-aged microstructures in an Al–Mg–Si aluminum alloy. *Scripta Mater.*, 68, 158–161.

6. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Шамрай В.Ф., Клочков Г.Г. (2007) Высокопрочный конструкционный Al–Cu–Li–Mg сплав пониженной плотности, легированный серебром. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 6, 3–7.
7. Коваль В.А., Лабур Т.М., Яворська Т.Р. (2020) Властивості з'єднань алюмінієвого сплаву марки В1341Т в умовах ТІГ зварювання. *Автоматичне зварювання*, 2, 38–43.
8. Ниркова Л.І., Лабур Т.М., Осадчук С.О., Яворська Т.Р. (2020) Корозійно-механічна тривкість зварних з'єднань алюмінієвого сплаву В1341, отриманих аргонодуговим зварюванням вільною та стиснутою дугою. *Там само*, 12, 44–51.
9. Ниркова Л.І., Осадчук С.О., Коваленко С.Ю. та ін. (2020) Вплив термооброблення на корозійну тривкість зварного з'єднання алюмінієвого сплаву системи Al–Mg–Si–Cu. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 5, 131–138.
10. ГОСТ 9.021-74 *Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию*. Москва, Издательство стандартов.
11. ГОСТ 9.904-83. *Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию*. Москва, Издательство стандартов.
12. ГОСТ 9.019-74. *Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые и магниевые. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание*. Москва, Издательство стандартов.
13. ГОСТ 9.005-72 *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами*. Москва, Издательство стандартов.
14. Жук Н.П. (1976) *Курс теории коррозии и защиты металлов*. Москва, Металлургия.

References

1. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2012) *Welding of modern structures of aluminium alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Krivov, G.A., Ryabov, V.R., Ishchenko, A.Ya. et al. (1998) *Welding in aircraft construction*. MIIVTs [in Russian].
3. Ovchinnikov, V.V., Grushko, O.E. (2005) High performance welded aluminium alloy V1341 of Al–Mg–Si system. *Mashinostroenie i Inzhen. Obrazovanie*, 3(4), 2–11 [in Russian].
4. Albert, D. (1993) Aluminium alloys in arc welded constructions. *Welding World Magazine*, 32(3), 97–114.
5. Pogatscher, S., Antrekowitsch, H., Leitner, H. et al. (2013) Influence of the thermal route on the peak-aged microstructures in an Al–Mg–Si aluminum alloy. *Scripta Mater.*, 68, 158–161.
6. Fridlyander, I.N., Grushko, O.E., Shamraj, V.F., Klochov, G.G. (2007) High-strength structural alloy Al–Cu–Li–Mg of lower density doped with silver. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, 6, 3–7 [in Russian].
7. Koval, V.A., Labur, T.M., Yavorska, T.R. (2020) Properties of joints of V1341T grade alloy under the conditions of TIG welding. *The Paton Welding J.*, 2, 35–40.
8. Nyrkova, L.I., Labur, T.M., Osadchuk, S.O., Yavorska, T.R. (2020) Corrosion and mechanical resistance of welded joints of aluminium B1341 alloy, produced by argon arc welding using free and constricted arc. *Ibid.*, 12, 40–47.
9. Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.O., Kovalenko, S.Yu. et al. (2020) Influence of heat treatment on corrosion resistance of welded joint of aluminium alloy of Al–Mg–Si–Cu system. *Fizyko-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 5, 131–138 [in Ukrainian].
10. GOST 9.021-74: *Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and aluminium alloys. Accelerated test methods for intercrystalline corrosion*. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
11. GOST 9.904-83: *Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and aluminium alloys. Accelerated*

- test methods for exfoliation corrosion. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
12. GOST 9.019-74: *Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and magnesium alloys. Accelerated test methods for corrosion cracking*. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
 13. GOST 9.005-72: *Unified system of corrosion and ageing protection. Metals, alloys, metallic and non-metallic coatings. Permissible and impermissible contacts with metals and non-metals*. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
 14. Zhuk, N.P. (1976) *Course of theory of corrosion and protection of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF V1341 ALLOY UNDER MODELED OPERATING CONDITIONS

L.I. Nyrkova, T.M. Labur, S.O. Osadchuk, M.R. Yavorska, V.A. Koval

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 paper presents the results of comparative studies of corrosion-mechanical resistance of welded joints of V1341 alloy 1.2 mm thick, produced by manual argon-arc welding with free and constricted arc, after different types of heat treatment (HT) – artificial aging and full cycle heat treatment (hardening and artificial aging). It was shown that artificial aging increases the strength characteristics of welded joints: those produced by free arc – by ~23%, compared to the base metal, by constricted arc – by ~29%, but reduces the relative elongation by ~82% and ~84%, and the strength coefficient – to 0.77 and 0.71 (0.81 and 0.83 in as-welded state), respectively. The full cycle of HT provides increase in both strength and ductility. After artificial aging, as well as after a complete heat treatment cycle, the potential difference between the base metal and the HAZ does not exceed the permissible value of 0.05 V (according to GOST 9.005), which will not be dangerous at operation in non-aggressive environments. Artificial aging and full HT cycle do not impair the resistance of welded joints of VB1341T alloy to exfoliating corrosion compared to as-welded state, which is assessed as value 2. An increase of resistance to intercrystalline corrosion (ICC) after artificial aging was demonstrated, the maximum depth of which was 0.301 mm for the joint produced by a free arc, and 0.233 mm – for a joint produced by a constricted arc (in as-welded state it was 0.350 mm and 0.47 mm, respectively). After a complete HT cycle, the ICC depth was 0.287 mm and 0.345 mm, respectively. Artificial aging reduces the corrosion-mechanical resistance of welded joints produced by free and constricted arc: the time to fracture of the samples was 9 and 12 days, respectively (compared to 45 days in as-welded state), but after a full cycle of HT maximum time to fracture of welded joints increased to 54 and 31 days, respectively. Welded joints produced by a constricted arc had higher corrosion-mechanical resistance after a complete heat treatment cycle. 14 Ref., 5 Tabl., 7 Fig.

Keywords: aluminum alloy, welded joints produced by free and constricted arc welding, mechanical properties, structure, intercrystalline corrosion, exfoliating corrosion, corrosion under constant strain, potentiometry, voltamperometry

Надійшла до редакції 18.01.2021

НОВА КНИГА

Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: *Збірник наукових статей за результатами, отриманими у 2016-2020 рр.* Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – Київ, 2020. – 712 с.



До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2016–2020 рр., до реалізації якої було залучено інститути НАН України. Мета програми – створення нових матеріалів з подовженим ресурсом роботи, розроблення наукових положень управління надійністю і довговічністю відповідальних об'єктів, створення ефективних методів, технічних засобів і технологій для оцінки і подовження ресурсу обладнання провідних галузей промисловості, нафто- та газопроводів, мостів, будівельних і транспортних конструкцій.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

З книгою можна ознайомитись в бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Попередні чотири випуски збірників «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, споруд та машин» у відкритому доступі за посиланням: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/compilations>.

ЗМІСТ

- РОЗДІЛ 1.** Розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки та авіакосмічної техніки.
- РОЗДІЛ 2.** Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації.
- РОЗДІЛ 3.** Розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації.
- РОЗДІЛ 4.** Розробка ефективних методів оцінки та подовження ресурсу об'єктів атомної енергетики.
- РОЗДІЛ 5.** Розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки та авіакосмічної техніки.
- РОЗДІЛ 6.** Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості.
- РОЗДІЛ 7.** Підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій.
- РОЗДІЛ 8.** Розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки з метою подовження терміну їх експлуатації.
- РОЗДІЛ 9.** Матеріали з подовженим ресурсом роботи для екстремальних умов експлуатації.

РОЗРОБКА ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ ЗАХИСНОГО ГАЗУ З'ЄДНАНЬ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ З МЕЖЕЮ МІЦНОСТІ 640...940 МПа

В.М. Шлепаков, О.С. Котельчук

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

Розглянуто результати досліджень властивостей порошкових дротів з металевим осердям, на основі яких запропоновано підходи до розробки складів порошкових дротів для електродугового зварювання в середовищі захисного газу з'єднань низьколегованих сталей підвищеної й високої міцності. На основі застосування динамічного термічного аналізу порошкових сумішей, що моделюють осердя дротів, одержано інформацію про кінетику процесів, які набувають розвитку при нагріванні й плавленні композицій порошкових дротів, що дозволяє оптимізувати склади осердя. Вироблені рекомендації з вибору й застосуванню порошкових дротів для зварювання низьколегованих високоміцних сталей. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: електродугове зварювання, порошковий дріт, низьколегована високоміцна сталь

Стійка тенденція зростання обсягів застосування низьколегованих сталей високої міцності для виготовлення зварних металоконструкцій інженерних споруд (наприклад, таких як магістральні системи транспортування газоподібних і рідких продуктів) та інших об'єктів, особливо таких, що експлуатуються у складних кліматичних умовах, стала стимулом для розширення досліджень і розробок в сфері створення нових електродних матеріалів для електродугового зварювання [1, 2]. Дослідження й розробки електродних матеріалів для зварювання сталей високої міцності з самого початку були спрямовані на управління мікроструктурою в частині оптимізації комбінації часток бейнітної, феритної та мартенситної складових. Досягнення заданого рівня показників властивостей суттєво утруднюється сильною залежністю динаміки формування мікроструктурних складових від параметрів режиму зварювання [3, 4]. Важливим кроком у розвитку уявлень про шляхи регулювання в'язко-пластичних властивостей металу зварних швів з'єднань високоміцних сталей стали роботи, присвячені ролі складу неметалевих включень, їх морфології й розподілу по границях зерен у формуванні мікроструктури й властивостей металу шва [5–9]. В основу розробки порошкового дроту для дугового зварювання з'єднань низьколегованих сталей високої міцності в середовищі захисного газу прийняті результати досліджень і розробок порошкових дротів з металевим осердям [7], типові зразки яких забезпечують досягнення оптимальних зварювально-технологічних властивостей. Численні дослідження

з вибору й оптимізації системи легування металу шва для зварювання високоміцних низьколегованих (ВМНЛ) сталей різного рівня міцності стали основою для узагальнення рекомендованих складів електродних матеріалів по системі легування у формі міжнародного стандарту [10].

Використання процесу дугового зварювання порошковим дротом у середовищі газових сумішей на основі аргону й вуглекислого газу як базової технології дозволяє забезпечити стійкість процесу переносу металу оболонки дроту й матеріалів порошкового осердя, що плавляться, у зварювальну ванну в межах використання діапазонів параметрів режиму, який характеризується струминним або струминно-краплинним перенесенням і який мінімілізує втрати електродного металу. При цьому процес плавлення електродного порошкового дроту й протікання реакцій взаємодії розплавленого металу з газовим захисним середовищем може регулюватися по окисній здатності в досить широких межах без погіршення зварювально-технологічних властивостей.

Мета цієї роботи – аналіз досліджень та вироблення рекомендацій по створенню порошкових дротів для електродугового зварювання в середовищі захисного газу з'єднань низьколегованих сталей підвищеної та високої міцності.

Основні результати досліджень і їх обговорення. Досвід застосування дротів типу «metal-core», порошкове осердя яких включає комплексну порошкову суміш мінеральних легкоплавких компонентів для металургійної обробки й рафінування металу зварювальної ванни, ліг в осно-

ву досліджень і розробки порошкових дротів для зварювання високоміцних сталей. У якості матеріалів, що флюсують, були використані легкоплавкі солі лужно-земельних металів (фтор-силікати, карбонати, алюмінати, фториди та ін.) з низькою гігроскопічністю, шлакові розплави яких асимілюють включення, що формуються у вигляді гострокутних часточок, плівкових виділень, шпінелей, які суттєво послаблюють міцність по границях зерен. Обробка розплавів сумішшю, що флюсує, розрахована на регулювання складу неметалевих включень та форм їх виділення по границях зерен, а також на зниження вмісту водню в металі шва за рахунок протікання реакцій його зв'язування фторидами. Склад шлакової системи, яка рафінує, оптимізується стосовно до характеристик порошкової суміші осердя дротів. При виготовленні порошкового дроту для зварювання сталей певного рівня міцності рекомендується проводити спеціальний контроль відповідності суміші вимогам з урахуванням можливої зміни складу сировинних матеріалів.

Побудова суміші, що рафінує, базується на використанні композиції сполук елементів з ІІА (Mg, Ca, Ba), ІІІА (Al) і ІVА (Si) груп Періодичної системи елементів. Метало-порошкова суміш входить до складу сольової композиції, що утворює легкоплавкі шлаки для рафінування, які спроможні вилучати неметалеві включення із металу зварювальної ванни до її кристалізації.

Вміст кисню в металі шва до деякої міри відбиває загальна кількість неметалевих включень оксидного типу, які впливають на холодостійкість металу шва. Оптимальним вважають вміст кисню в металі шва в межах 0,25...0,35 мас. %. Так, при зварюванні порошковим дротом рутилового типу в суміші $\text{Ag} + \text{CO}_2$ вміст кисню знижується до 0,022...0,025 мас. %, при цьому робота удару при -60°C становить 50 Дж, у порівнянні зі зварюванням цим же дротом у середовищі CO_2 , коли вміст кисню може досягати 0,05...0,06 мас. %, а показники роботи удару знижуються і при -40°C становлять близько 27 Дж.

Проектування композицій сумішей, що рафінують, проводили, ґрунтуючись на результатах динамічного термічного аналізу дослідних порошкових сумішей, склад яких підібрано з урахуванням базових принципів легування металу швів при зварюванні сталей високої міцності відповідно категоріям міцності. Комплексний термогравіметричний аналіз у комбінації з диференційною скануючою калориметрією дозволив визначити інтервали температур формування металевих і шлакових розплавів, кількісно оцінити ступінь розвитку термохімічних реакцій взаємодії досліджуваних композицій з газовим середовищем у процесі динамічного на-

грівання (зокрема, термічну деструкцію й випаровування компонентів, а також окиснення металевих складових). На рис. 1, а наведено результати термогравіметричного аналізу модельного осердя порошкового дроту оксидно-фторидного типу, що містить лігатури на основі Al (зокрема, лігатури Al·Li та Al·Mg), а на рис. 1, б – результати аналізу цього ж зразка осердя порошкового дроту методом диференційної скануючої калориметрії разом з підрахунком сумарних теплових ефектів реакцій. Процес нагрівання шихт порошкових дротів оксидно-фторидного типу характеризується екзотермічними ефектами при температурах порядку 600 і 800°C великої інтенсивності, які супроводжуються збільшенням маси зразка та зниженням вмісту кисню в газовій фазі нагрівальної камери, що свідчить про інтенсифікацію процесів окиснення порошків лігатур Al та Mg, залізного порошку і феросплавів відповідно. Шлаковий розплав утворюється в інтервалі температур 1190...1220 $^\circ\text{C}$, що відзначається відповідним ендотермічним ефектом, який досягає максимуму при температурі близько 1200°C .

Утворення розплавів ще на стадії нагрівання порошкового осердя на вильоті електродного дроту, до плавлення оболонки дроту й виділення газоподібних продуктів (CO , CO_2 , SiF_4 та ін.) визначає захисні функції порошкового дроту й суттєво впливає на хід реакцій взаємодії металу з газами на стадіях краплі й ванни. Температурні інтервали термохі-

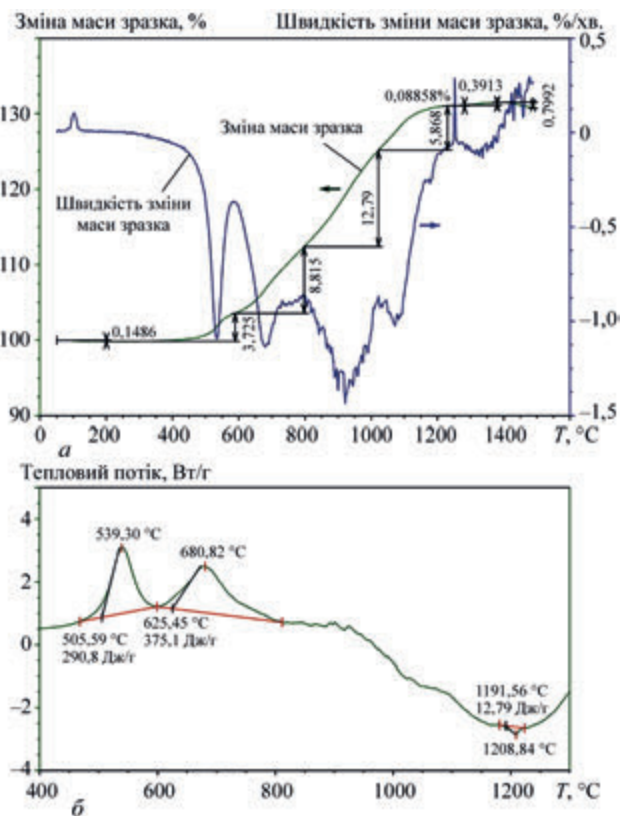


Рис. 1. Результати термогравіметричного аналізу (а) та аналізу методом диференційної скануючої калориметрії (б) модельного осердя порошкового дроту оксидно-фторидного типу

мічних реакцій (наприклад, ендотермічні процеси видалення вологи, деструкції, плавлення та екзотермічні – окислення, утворення комплексних сполук), які супроводжують процес нагрівання, перебиваються, а їх теплові ефекти накладаються один на одного, стимулюючи розвиток одних процесів і гальмуючи інші. Таким чином, управління цими термохімічними реакціями за рахунок коригування складу осердя дозволяє регулювати швидкість його плавлення, досягаючи сприятливих характеристик плавлення порошкового дроту в цілому, а також перенесення електродного металу у зварювальну ванну. Специфічні дані стосовно величини теплового потоку при нагріванні порошкових композитів дозволяють оцінювати витрати тепла на їх нагрівання й плавлення з урахуванням взаємного впливу екзотермічних реакцій, що набувають розвитку в осерді порошкового дроту.

Низьколеговані зварювальні матеріали, розроблені для зварювання високоміцних сталей, повинні задовольняти підвищеним вимогам стосовно свого складу для забезпечення низького вмісту водню в металі шва. Висока концентрація дифузійно-рухливого водню у зварному з'єднанні може призводити до утворення холодних тріщин, тому при зварюванні високоміцних сталей необхідно мінімізувати кількість водню, що потрапляє у зварювальну ванну. Це досягається за рахунок початково низького вмісту водню в присадковому матеріалі та захисному газі, а також за рахунок забезпечення умов зварювання, при яких виключається надходження вологи та інших сполук водню в зону зварювання з навколишнього середовища.

При зварюванні сталей з межею плинності до 520 МПа допустимий рівень вмісту водню в металі шва обмежують 5 см³/100 г наплавленого металу, а при зварюванні сталей з межею плинності 620 МПа й вище – до 3 см³/100 г наплавленого металу.

Для виготовлення порошкових дротів, призначених для зварювання високоміцних сталей потрібно не тільки використовувати вихідні сировинні матеріали з низьким вмістом водню, але й необхідно забезпечити постійний контроль зволоження всіх сировинних матеріалів і готової шихти при їх зберіганні та у процесі виготовлення дроту, а також забезпечити такі умови зберігання й використання цих матеріалів, що гарантують відсутність їх зволоження. Це досягається використанням термостатованих контейнерів на всіх етапах виготовлення порошкового дроту. Очищення сталевих стрічки повинне гарантувати відсутність вологи й залишків консерваційного змащення на поверхні стрічки безпосередньо перед подаванням її на формування оболонки дроту та заповнення шихтою.

Поставка споживачеві порошкового дроту для зварювання високоміцних сталей здійснюється в

герметичному пакуванні з алюмінієвої фольги, загерметизованому під низьким вакуумом. Строки використання порошкового дроту, вилученого з герметичного пакування, обмежується документальною на виконання зварних з'єднань сталей підвищеної й високої міцності.

Контроль вмісту дифузійного водню в сировинних матеріалах, які використовуються в якості компонентів осердя порошкових дротів і шихтах осердя порошкових дротів дозволяє виокремити компоненти й композиції, використання яких без спеціальної обробки в осерді порошкових дротів для зварювання високоміцних сталей необхідно обмежувати. Корисним для досягнення цієї мети є термічний аналіз таких матеріалів, сполучений з мас-спектрометрією газової фази. Враховуючи можливе окиснення металевих порошоків при нагріванні до високих температур (700...1000 °C), термічний аналіз проводять у потоці інертного газу (як правило, аргону) для оцінки внутрішнього окиснення без впливу атмосфери повітря.

Порошкові металеві матеріали (Fe·Mn, Mo, Fe·Si, Al, Al·Mg, Al·Ca) при нагріванні втрачають адсорбовану вологу в діапазоні температур 110...240 °C. При подальшому нагріванні видаляється структурно зв'язана волога. Цей процес супроводжується розвитком процесів внутрішнього окиснення. Результати термічного аналізу дозволяють визначити оптимальні умови, при яких внутрішнє окиснення не виявляє істотного впливу на видалення водню і його сполук. Термообробку більшості матеріалів доцільно проводити в діапазоні температур 200...400 °C залежно від типу дроту, що виготовляється. Більш повне видалення водню і його сполук можливо досягти термообробкою окремих порошоків у захисному середовищі або вакуумі. Проте навіть термообробка порошкових сумішей у звичайних умовах дозволяє на 85 % знизити вміст потенційного водню в осерді порошкового дроту.

Вплив очищення стрічки й обробки поверхні порошкового дроту на зниження вмісту дифузійного водню в металі шва було експериментально перевірене на дослідних зразках порошкових дротів карбонатно-флюоритного типу й типу «metal-core» із з'ясованим складом легуючої частини осердя. Для виготовлення таких дослідних порошкових дротів використовувалася холоднокатана сталеві стрічка типу 08Ю розмірами 0,8×12 мм, яка очищувалась від залишків консерваційного мастила, що є одним з найбільших джерел дифузійного водню в порошкових дротах, двома способами: механічним та промиванням розчином, що знежирює. Результати аналізу вмісту дифузійного водню в стрічках очищених першим і другим способами виявилися близькими й склали близько 1,2 см³/100 г металу.

Для запобігання підвищення вмісту водню в порошковому дроті корисним виявилось нанесення покриття, що інгібує, на поверхню дроту після її очищення. Пакування дроту у великовантажні контейнери типу «Marathon» небажано через труднощі забезпечення необхідної герметичності й необхідність якнайшвидшого використання дроту після розкриття пакування.

Розробка композицій осердя порошкового дроту для зварювання сталей різних класів міцності. Дослідження й розробку порошкових дротів для зварювання низьколегованих високоміцних сталей у середовищі захисного газу проводили з урахуванням досвіду виробництва сталей відповідного класу міцності. У процесі виробництва таких сталей при їх виплавці застосовуються операції рафінування та позапічної обробки на стадії розливання, а також термічної обробки (загартування, відпусчення) при прокатці, у результаті яких сталевий прокат (сталь) набуває однорідної мікроструктури переважно бейнітно-мартенситного класу.

Регулювання показників фізико-механічних властивостей сталей й електродних матеріалів для їх зварювання досягається за рахунок мікрولهгування карбідо- і нітридоутворюючими елементами (ванадієм, ніобієм, цирконієм, титаном) при зниженні вмісту вуглецю та базовому легуванні марганцем, кремнієм, нікелем, молібденом, хромом.

Аналіз відомих систем мікрولهгування ванадієм, титаном, ніобієм і цирконієм дозволив вибрати найбільш придатну відповідно завданням зварювання низьколегованих високоміцних сталей систему мікрولهгування через осердя порошкового дроту й визначити оптимальні межі такого мікрولهгування. Оптимум досягається (рис. 2 і

3) для мікрولهгування V – до 0,08; Ti – до 0,05; Nb – до 0,02; Zr – до 0,09 мас. %. Зниження пластичності (величини A_5 і KV) обумовлено окрихченням границь зерен. V, Ti і Nb здатні утворювати карбонітриди плівкового типу.

Проведена оптимізація складу комплексного мікрولهгування металу шва через осердя порошкового дроту з урахуванням адсорбційної активності карбо- та нітридоутворюючих та лужно-земельних елементів, а також експериментально оцінено вплив мікрولهгування на структурно-чутливі механічні властивості зварного з'єднання.

Основні вимоги до властивостей металу швів і зварних з'єднань високоміцних сталей, виконаних електродуговим зварюванням плавленням у середовищі захисних газів, обумовлені міжнародним стандартом EN ISO 18276 «Дроти порошкові для зварювання високоміцних сталей у захисних газах» [10]. Стосовно хімічного складу визначені межі легування металу шва по вмісту Mn, Ni, Cr та Mo відповідно до рівня показників міцності, а по вмісту домішок: по вуглецю – 0,03...0,1 мас. %, сірки – не більш 0,020 мас. % та фосфору – не більш 0,020 мас. %, по елементам легування – у відповідності з заданим рівнем міцності. Рекомендоване обмеження вмісту водню в наплавленому металі – не більш 5 см³/100 г наплавленого металу.

Композиції порошкових дротів для зварювання в середовищі захисного газу розроблялися з урахуванням основних вимог стандарту відповідно категорії порошкового дроту по показникам міцності.

В табл. 1 і 2 наведені показники властивостей порошкових дротів для дугового зварювання ВМНЛ сталей в захисних газах (82% Ar+18% CO₂).

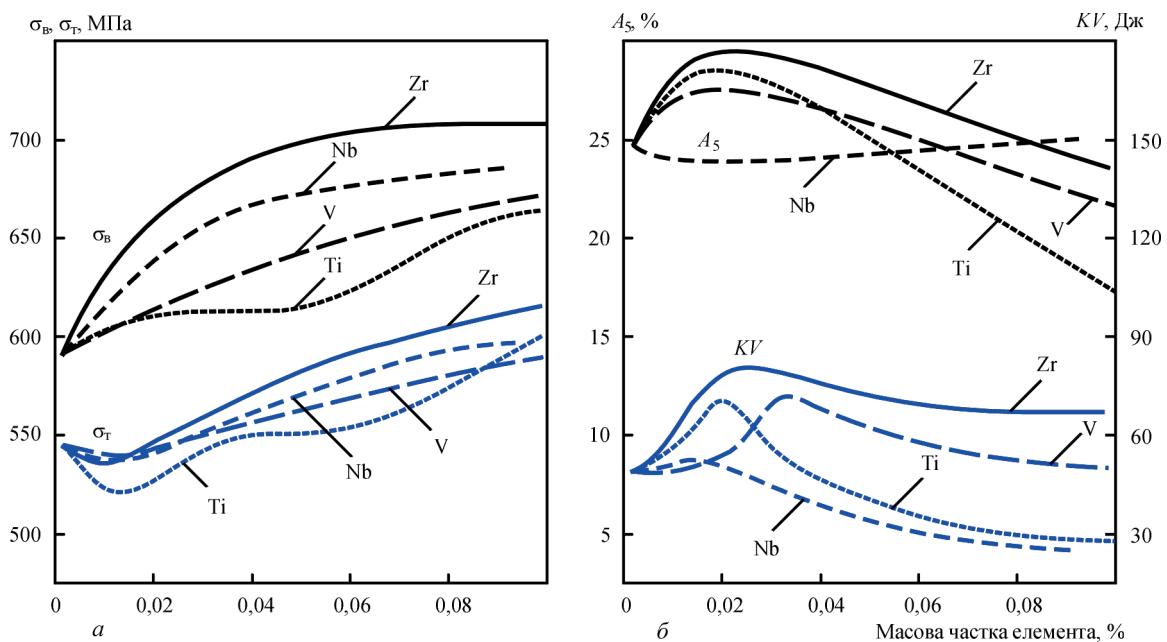


Рис. 2. Механічні властивості металу зварних швів при мікрولهгуванні V, Ti, Nb і Zr: межа плинності σ_T і тимчасовий опір розриву σ_B (а) та відносне подовження A_5 й робота удару KV при температурі випробування -40°C (б)

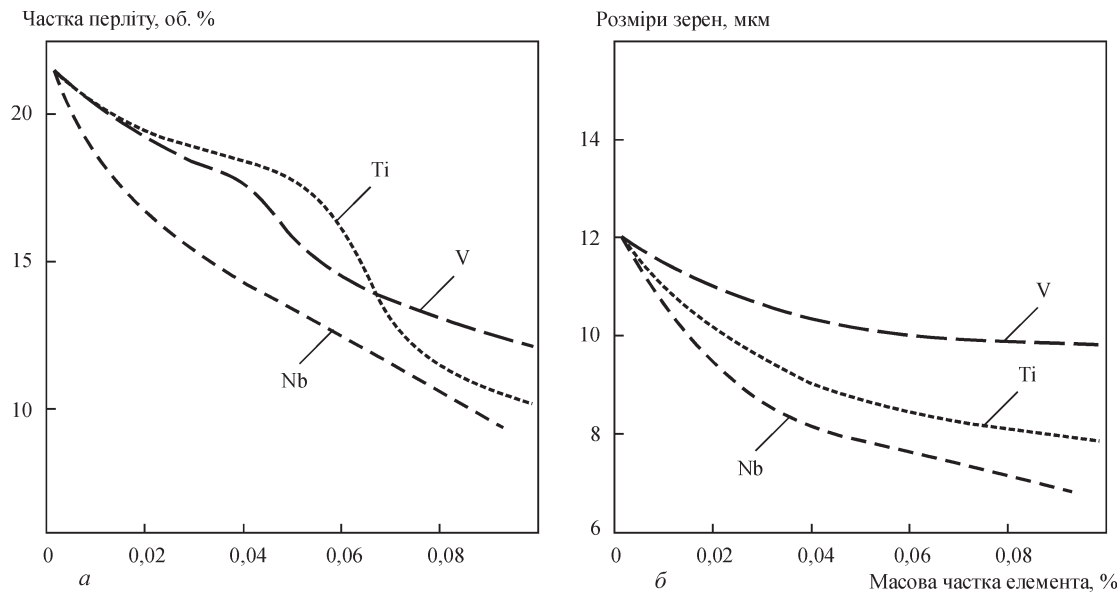


Рис. 3. Вплив мікролегування V, Ti і Nb на мікроструктуру металу: частку перлітної складової мікроструктури в структурі металу (а) і розміри зерен (б)

Таблиця 1. Механічні властивості металу зварного шва ВМНЛ сталей різних класів міцності

Класифікація порошкового дроту за стандартом EN ISO 18276	Мінімальне значення межі плинності сталі, що зварюється, МПа	Показники властивостей металу шва и зварного з'єднання			
		Межа плинності, МПа	Тимчасовий опір розриву, МПа	Подовження A_5 , %	Робота удару ISO – V (Дж) при температурі випробування
EN ISO 18276-A: T 55 5 Z M M 1 H5	550	> 550	640...820	> 22	> 47; –50 °C
EN ISO 18276-A: T 55 41 NiMo B M 2 H5		> 550	640...760	> 23	> 60; –40 °C
EN ISO 18276-A: T 55 61 NiMo B C 2 H5					
EN ISO 18276-A: T 62 41 NiMo P M 1 H5	620	> 620	700...800	> 20	> 47; –40 °C
EN ISO 18276-A: T 62 5 Mn2,5Ni P M 1 H5		> 620	700...890	> 18	> 62; –40 °C > 47; –50 °C
EN ISO 18276-A: T 69 4 Z P M 1 H5	690	> 690	770...940	> 17	> 50; –40 °C

Таблиця 2. Хімічний аналіз складу металу шва ВМНЛ сталей різних класів міцності (типові значення в мас. %)

Класифікація порошкового дроту за стандартом EN ISO 18276	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
EN ISO 18276-A: T 55 5 Z M M 1 H5	0,06	1,7	0,6	< 0,015	< 0,015	–	0,6	0,3
EN ISO 18276-A: T 55 41 NiMo B M 2 H5								
EN ISO 18276-A: T 55 61 NiMo B C 2 H5	0,07	1,3	0,4	0,01	0,01	–	1,1	0,4
EN ISO 18276-A: T 62 41 NiMo P M 1 H5	0,07	1,40	0,40	< 0,015	< 0,015	–	0,9	0,4
EN ISO 18276-A: T 62 5 Mn2,5Ni P M 1 H5	0,08	1,35	0,35	< 0,015	< 0,015	–	2,2	–
EN ISO 18276-A: T 69 4 Z P M 1 H5	0,06	1,4	0,4	< 0,010	< 0,010	–	2,9	0,35
EN ISO 18276-A: T 69 4 Mn2NiCrMo M M 1 H5	0,05	1,5	0,5	0,01	0,01	0,4	2	0,4

Висновки

Отримані результати покладені в основу розробки порошкових дротів для зварювання ВМНЛ сталей і дозволили сформулювати основні етапи такої розробки наступним чином:

- розробка композиції осердь порошкових дротів для зварювання високоміцних сталей у захисній атмосфері захисного газу типу M21 (суміш Ar + CO₂) з урахуванням класу міцності від 600 до 800 МПа, які забезпечують досягнення струминного або струминно-краплинного переносу електродного металу при базовому діаметрі дроту 1,2 мм та дотриманні рекомендованих параметрів режиму зварювання;
- розрахунки хімічного складу наплавленого металу для швів, як одержують при дуговому зварюванні

плавленням на основі базових рекомендацій, внесених у стандарт EN ISO 18276 для зварювання сталей відповідного рівня міцності, що визначає частку дисперсної бейнітної складової мікроструктури шва, яка утворюється при аустенітно-феритному перетворенні в процесі охолодження металу зварного шва;

– експериментальне підтвердження відповідності мікроструктурного складу металу шва висунутим вимогам при дотриманні рекомендованих параметрів зварювального процесу;

– проведення повного циклу випробувань і перевірка відповідності результатів цих випробувань технічним вимогам, що висуваються до показників властивостей для з'єднань сталей відповідного рівня міцності.

Список літератури

1. Karlsson, L., Bhadeshia, H.K.D.H. (2007) Novelty in Welding Consumables. *Australian Welding J.*, 56, Third Quarter, 44–49.
2. Малышевский В.А., Грищенко Л.В., Барышников А.П. (1999) Сварочные материалы и технология сварки высокопрочных сталей. *Вопросы материаловедения*, 3, 20, 46–62.
3. Widgery, D.J., Karlsson, J., Muruganath, M., Keehan, E. (2002) Approaches in the development of high strength steel weld metals. *Proc. of 2nd Intern. symposium on high strength steel weld metals. Norway, Brussels, Belgium. The European Coal and Steel Community*, 1–10.
4. Wang W., Lin S. (2002) Alloying and microstructural management in developing SMAW electrodes for HSLA-100 steel. *Welding J., Research Supplement*, 81, 132–145.
5. Keehan E., Karlsson L., Andron H.-O. Svensson L.-E. (2006) New developments with C–Mn–Ni high strength steel weld metals properties. *Ibid.*, 85, 211–218.
6. Keehan, E., Karlsson, L., Thuvander, M., Bergquist, E.L. (2007) Microstructural characterization of as deposited and reheated weld metal – high strength steel weld metals. *Welding in the World*, 51, 44–49.
7. Шлепаков В.Н., Котельчук А.С. (2019) Улучшение качества, технологических и санитарно-гигиенических характеристик процесса дуговой сварки в среде защитного газа. *Автоматическая сварка*, 6, 33–38. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.06.05>
8. Koseko, T., Thewlis, G. (2005) Inclusion in welds. *Material Science and Technology*, 21, 867–869.
9. Барышников А.П., Грищенко Л.В., Малышевский В.А. и др. (1996) Влияние содержания кислорода на ударную вязкость металла шва, выполненного в среде защитных газов. *Прогрессивные материалы и технологии*, 2, 221–227.
10. (2005) DSTU EN ISO 18276:2015 (EN ISO 18276:2006, IDT; ISO 18276:2006, IDT) *Матеріали зварювальні. Дрім порошковий для зварювання високоміцних сталей в захисних газах. Класифікація. ISO 18276:2006 (En) Welding consumables – Tubular cored electrodes for gas-shielded and non-gas-shielded metal arc welding of high-strength steels – Classification. ISO Office, Switzerland.*

References

1. Karlsson, L., Bhadeshia, H.K.D.H. (2007) Novelty in welding consumables. *Australian Welding J.*, 56, Third Quarter, 44–49.
2. Malyshevsky, V.A., Grishchenko, L.V., Baryshnikov, A.P. (1999) Welding consumables and technology of welding of high-strength steels. *Voprosy Materialovedeniya*, 3(20), 46–62 [in Russian].
3. Widgery, D.J., Karlsson, J., Muruganath, M., Keehan, E. (2002) Approaches in the development of high strength steel weld metals. In: *Proc. of 2nd Intern. Symposium on High Strength Steel Weld Metals (Norway, Brussels, Belgium). The European Coal and Steel Community*, 1–10.
4. Wang, W., Lin, S. (2002) Alloying and microstructural management in developing SMAW electrodes for HSLA-100 steel. *Welding J., Research Supplement*, 81, 132–145.
5. Keehan, E., Karlsson, L., Andron, H.-O. Svensson, L.-E. (2006) New developments with C–Mn–Ni high strength steel weld metals properties. *Ibid.*, 85, 211–218.
6. Keehan, E., Karlsson, L., Thuvander, M., Bergquist, E.L. (2007) Microstructural characterization of as deposited and reheated weld metal – high strength steel weld metals. *Welding in the World*, 51, 44–49.
7. Shlepakov, V.N., Kotelchuk, A.S. (2019) Improvement of technological and sanitary-hygienic characteristics of gas-shielded arc welding process. *The Paton Welding J.*, 6, 29–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.06.05>
8. Koseko, T., Thewlis, G. (2005) Inclusion in welds. *Material Sci. and Technol.*, 21, 867–869.
9. Baryshnikov, A.P., Grishchenko, L.V., Malyshevsky, V.A. et al. (1996) Effect of oxygen content on impact toughness of weld metal produced in shielding gas medium. *Progressivnye Materialy i Tekhnologii*, 2, 221–227 [in Russian].
10. (2005) DSTU EN ISO 18276:2015 (EN ISO 18276:2006, IDT; ISO 18276:2006, IDT): *Welding consumables. Tubular cored electrodes for gas-shielded and non-gas-shielded metal arc welding of high-strength steels. Classification. ISO Office, Switzerland.*

DEVELOPMENT OF NEW GENERATION FLUX-CORED WIRES FOR GAS-SHIELDED ARC WELDING OF JOINTS OF LOW-ALLOY STEELS WITH ULTIMATE STRENGTH OF 640...940 MPa

V.M. Shlepakov, O.S. Kotelchuk

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 results of studying the properties of flux-cored wires with a metal core are considered, which were used as a base for suggesting approaches to development of compositions of flux-cored wires for gas-shielded arc welding of joints of low-alloy steels of higher and high strength. Application of dynamic thermal analysis of powder mixtures that model the wire core, enabled obtaining information on kinetics of the processes which develop at heating and melting of flux-cored wire compositions that allows optimizing the core compositions. Recommendations were developed on selection and application of flux-cored wires for welding low-alloy high-strength steels. 10 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: arc welding, flux-cored wire, low-alloy high-strength steel

Надійшла до редакції 02.12.2020



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Десята міжнародна конференція
**ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ
та ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ**

6 – 11 вересня 2021 р.
Україна, Одеса



АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ
Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./факс: (38044) 200-82-77; E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/ukr/ltwmp2021>

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І МЕТАЛУРГІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ФОРМУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МІДІ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ЗВАРЮВАННІ

В.М. Нестеренков, Л.А. Кравчук, М.О. Русиник

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

Проведено дослідження щодо впливу технологічних і металургічних чинників на формування зварних з'єднань при електронно-променевому зварюванні міді марки М1 завтовшки $\delta = 18$ мм вертикальним електронним пучком, в нижньому положенні, за один прохід. Система комп'ютерного управління процесу електронно-променевого зварювання на установці УЛ-209М дозволяє виконувати в єдиному технологічному циклі чистку прилеглої зони стику від залишків забруднень і оксидів за допомогою сфокусованого на поверхні металу малопотужного електронного пучка. Застосування високошвидкісної локальної розгортки електронного пучка по колу дозволило істотно знизити температуру в центральній частині зварювальної ванни і, таким чином, виключити пропали і виплеск металу шва. Встановлено, що оптимальна швидкість зварювання при прискорюючій напрузі $U_{\text{приск.}} = 60$ кВ знаходиться в діапазоні $v_{\text{зв}} = 6 \dots 8$ мм/с. Металургічна обробка зварювальної ванни за допомогою вставок з алюмінієвої і титанової фольги усуває схильність до утворення пір в металі шва. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, електронний пучок, комп'ютерне управління, кругова розгортка, глибина проплавлення, погонна енергія, швидкість зварювання, ширина лицьового валика, пористість

При електронно-променевому зварюванні (ЕПЗ) міді має місце ряд труднощів, які обумовлені в основному її високою теплопровідністю, підвищеною рідкоплинністю, інтенсивним випаровуванням у вакуумі при нагріванні вище температури плавлення, а також значною активністю металу при взаємодії з киснем та воднем в розплавленому стані. Висока теплопровідність призводить до підвищених швидкостей охолодження металу шва і біляшовної зони і до малого часу перебування зварювальної ванни в рідкому стані, що призводить до погіршення формування шва і необхідності додаткових досліджень по зниженню пористості швів.

Підвищена рідкоплинність міді не дозволяє виконувати одностороннє стикове зварювання з повним проплавленням кромок в нижньому і вертикальному положеннях. Для задовільного формування шва із зворотнього боку застосовують підкладки, які щільно прилягають до зварювального металу, або обмежуються замковим з'єднанням при некрізному проплавленні.

Застосування при зварюванні міді електронних пучків з нормальним (гаусовським) розподілом щільності потужності призводить до перегріву металу у приосьовій зоні, інтенсивному його випаровуванню і, як наслідок, розбризкуванню та незадовільному формуванню шва [1]. У зв'язку з цим, при електронно-променевому зварюванні міді товщиною $\delta > 4$ мм використовують електронно-оптичні системи, що забезпечують рівномірність струму по перерізу пучка, або системи,

в яких максимальна щільність струму зміщена за межі приосьової зони [2, 3].

Великий вплив на якість зварних з'єднань при ЕПЗ міді надає вміст у ній домішок [4]. Найбільш шкідливою домішкою, що знижує механічні, технологічні та антикорозійні властивості міді, є кисень, вміст якого має бути обмеженим і зведено до мінімуму шляхом розкислення [5].

У зв'язку з викладеним вище було проведено комплекс досліджень по ЕПЗ міді марки М1 товщиною $\delta = 18$ мм з метою визначення оптимальних енергетичних, тимчасових та геометричних параметрів електронного пучка, а також впливу підготовки кромок, що зварюються, і металургічних методів на формування і якість зварних з'єднань.

Методика досліджень. ЕПЗ плоских зразків з марки міді М1 товщиною $\delta = 18$ мм розміром $200 \times 80 \times 18$ мм виконували в нижньому положенні, вертикальним електронним пучком на установці УЛ-209М з комп'ютерним управлінням всіма параметрами і системами (вакуум, переміщення і поворот електронно-променевої гармати (ЕПГ), струм зварювання, швидкість зварювання, фокусування і відхилення електронного пучка, локальна розгортка), створеної в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [6]. Установка УЛ-209М укомплектована енергетичним комплексом на базі ЕЛА-60/60 та ЕПГ, що переміщується всередині вакуумної камери по лінійним координатам X, Y, Z , а також що повертається навколо осі Y - Y на кут $0 \dots 90^\circ$. При прискорюючій напрузі $U_{\text{приск.}} = 60$ кВ ЕПГ з металевим вольфрамовим катодом

Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, Русиник М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-7591-7169>

© В.М. Нестеренков, Л.А. Кравчук, М.О. Русиник, 2021

діаметром 3 мм забезпечує діапазон струму електронного пучка $I_n = 0 \dots 500$ мА, а також виконання технологічних розгортки пучка в процесі ЕПЗ. Забезпечується точність позиціонування ЕПГ по координатам не гірше 0,1 мм. Суміщення електронного пучка зі стиком забезпечується системою РАСТР з точністю не гірше 0,1 мм [7].

Робоча відстань від торця ЕПГ до поверхні зварювальних зразків складала 200 мм, залишковий тиск в зварювальній камері досягав $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Безпосередньо перед зварюванням зразки знежирювали бензином авіаційним (ГОСТ1012-72) або уайт-спіритом (ГОСТ 3134-52), а потім торці і прилеглі до них ділянки шириною 10 мм шабрили вручну. Електронний пучок фокусували над поверхнею зварюваних встик зразків, а величину струму зварювання встановлювали таким чином, щоб при оптимальній погонній енергії забезпечувалося наскрізне проплавлення за один прохід з гарантованим формуванням лицьового валика шва і точковими проколами зі зворотного боку шва.

Механічні випробування на розтяг круглих (тип II) зразків зварних з'єднань і основного металу проводили на розривній машині типу ЦДМ-10Р (Німеччина) по ГОСТ 6996-66. При виготовленні круглих зразків на розтягнення вибирали середню частину зварного шва по глибині проплавлення. Виготовляли також плоскі зразки з V-подібним надрізом (тип XI) для визначення ударної в'язкості.

Структуру зварних з'єднань досліджували на оптичному мікроскопі типу «Неофот-32» при збільшенні $\times 20 \dots 500$. Характер зниження міцності основного металу у ЗТВ визначали шляхом вимірювання твердості на поперечних шліфах на мікротвердометрі типу М-400 фірми «КОМПАС» при навантаженні 1Н (час прикладання 10 с) на трьох рівнях по глибині проплавлення (верх, середина, низ).

Хімічний склад марки міді М1, наведений в таблиці, визначали методом емісійного спектрального аналізу на установці ICAP6500 DUO («Thermo Electron Corporation», Великобританія). Газовий аналіз, проведений на установці RO-316 («LECO», США) та установці RH-402 («LECO», США), показав, що вміст кисню і водню в досліджуваній міді М1 менше допустимих значень ГОСТу і становить $O_2 = 0,0028$ мас. %, $H = 0,0012$ мас. %, відповідно.

Оцінку результатів ЕПЗ міді М1 товщиною $\delta = 18$ мм виробляли за наступними критеріями:

Хімічний склад міді, мас. %

Марка міді	Вміст домішок, не більше											Склад міді
	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	Zn	P	Ag	
М1*	0,0003	-	0,0007	0,004	0,0001	0,0013	0,0001	-	0,0017	-	0,0055	99,98
М* – хімічний склад міді визначали емісійним спектральним методом.												

стабільність процесу, відтворюваність результатів, формування заданої геометрії проплавлення, щільність і міцність зварного з'єднання, мінімальна пористість і відсутність тріщин.

Результати технологічних досліджень. Позбавлення високотемпературної приосьової частини плями нагріву при ЕПЗ міді М1 досягалось шляхом високошвидкісної розгортки електронного пучка по колу, коли розподіл результуючого теплового потоку являє собою прямокутний імпульс з плоскою вершиною і пологими краями або криву з двома максимумами [8, 9]. При цьому потужність електронного пучка розподіляється уздовж траєкторії розгортки практично рівномірно при частотах $f_{розг} \geq 1000$ Гц [8]. Як показано на рис. 1, змінюючи діаметр обертання електронного пучка, можна істотно знизити температуру в центральній частині зварювальної ванни і, таким чином, виключити пропали і виплеск металу шва.

Однак, через теплофізичні властивості міді, що призводять до високих швидкостей охолодження металу шва, було встановлено, що при струмі електронного пучка $I_n \geq 150$ мА, швидкості зварювання $v_{зв} \geq 5$ мм/с і діаметрі кругової розгортки $D > 1,5$ мм стає неможливим формування зварного шва без кратерів і розбризкування металу шва (рис. 2). Дослідні проплавлення на міді глибиною до $h_{пр} = 18$ мм і при $D = 1,5$ мм показали, що положення фокуса електронного пучка відносно поверхні зразка в межах ± 5 % не призводить до усунення згаданих дефектів. Подальші дослідження з підбору режимів ЕПЗ міді марки М1 проводилися при діаметрі кругової розгортки $D = 1,5$ мм.

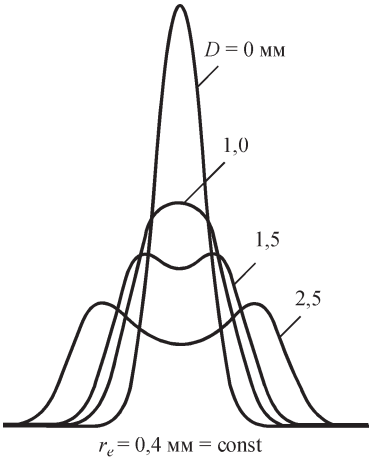


Рис. 1. Розподіл щільності потужності електронного пучка при вимірюванні діаметра кругової розгортки D та постійному ефективному радіусі пучка r_e

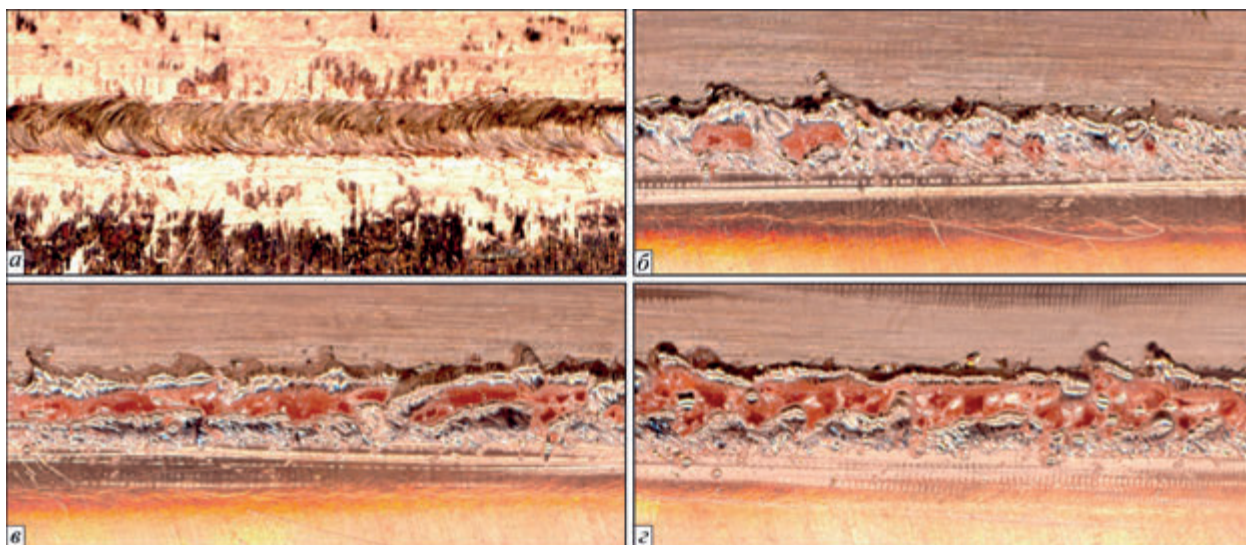


Рис. 2. Формування лицьового валику шва при ЕПЗ міді марки М1 товщиною $\delta = 18$ мм з різними діаметрами кругової розгортки: а – $D = 1,5$ мм; б – 2,0; в – 2,5; з – 3,0. Режим ЕПЗ: $U_{\text{пр}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} = 190$ мА; $v_{\text{зв}} = 7,5$ мм/с; $\Delta I_{\text{ф}} = 0$ мА; $l_{\text{роб}} = 200$ мм ($\times 2$)

Вибір оптимального значення швидкості зварювання визначається, з одного боку, умовою мінімальної інтенсивності гідродинамічних збурень в зварювальній ванні [10], з іншого, умовою мінімальної ширини шва для зниження деформацій, підвищення тріщиностійкості, зниження до мінімуму пористості зварного з'єднання. Швидкість зварювання істотно впливає на здатність проплавлення електронного пучка і величину погонної енергії зварювання. У роботах [11, 12] показано, що при ЕПЗ міді марки М1 завтовшки 12,5 мм з прискорюючою напругою $U_{\text{приск.}} = 28$ кВ оптимальним є діапазон швидкостей зварювання 6...8 мм/с, а при підвищених швидкостях зварювання збільшується нестабільність глибини проплавлення і величина несплавлення в корені шва. Для уточнення впливу швидкості зварювання на величину погонної енергії нами були проведені дослідження по визначенню характеру залежності $q/v = f(v_{\text{зв}})$ в діапазоні швидкості зварювання $v_{\text{зв}} = 5...10$ мм/с при прискорюючій напрузі $U_{\text{пр}} = 60$ кВ. Як показано на рис. 3, величина погонної енергії в досліджуваному діапазоні швидкості зварювання змінюється істотно: спочатку зменшується досить різко по залежності q/v , а починаючи зі швидкості зварювання $v_{\text{зв}} = 7,5$ мм/с зниження сповільнюється. Аналогічним чином змінюється залежність $B_1 = f(v_{\text{зв}})$ і при швидкості зварювання $v_{\text{зв}} = 7,5$ мм/с ширина лицьового валика шва становить $B_1 \approx 2,5$ мм/с. З урахуванням даних роботи по пористості металу шва [11] і на підставі отриманих нами залежностей подальші дослідження проводилися при швидкості зварювання $v_{\text{зв}} = 7,5$ мм/с.

Основний дефект металу шва при ЕПЗ міді – пористість. Для попередження пір необхідно спочатку забезпечити видалення з поверхні кромки, що зварюються, оксидів, адсорбованої вологи і

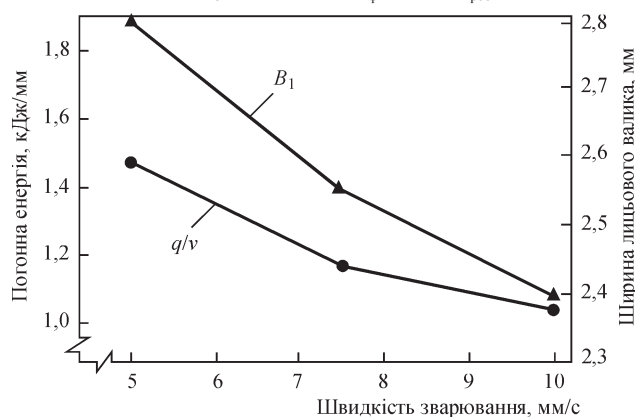


Рис. 3. Залежність величини погонної енергії q/v та ширини лицьового валика шва B_1 від швидкості ЕПЗ міді марки М1 товщиною $\delta = 18$ мм. Режим ЕПЗ: $U_{\text{приск.}} = 60$ кВ; $\Delta I_{\text{ф}} = 0$ мА; $l_{\text{роб}} = 200$ мм; $D = 1,5$ мм

жирових плівок. В єдиному технологічному циклі ЕПЗ на установці УЛ-209М може бути додатково проведена чистка прилеглої зони стику від залишків забруднень і оксидів за допомогою сфокусованого на поверхні металу електронного пучка потужністю, що не приводить до розплавлення кромки стику. У режимі $U_{\text{приск.}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} \approx 10$ мА, $v_{\text{зв}} = 7,5$ мм/с, $D \approx 10$ мм виконувався прохід по всій довжині стику перед виконанням основного зварювального проходу [6].

Металургійна обробка зварювальної ванни для усунення схильності до утворення пір в металі шва і поблизу лінії сплавлення, а також кристалізаційних тріщин при ЕПЗ міді М1 здійснювалася за допомогою вставляння в стик фольги з алюмінію (сплав АД0 товщина 0,04 мм) і титану (сплав ВТ1-00, товщина 0,05 мм), що виконують роль активних розкислювачів і нітридоутворюючих елементів [13, 14]. Змінюючи ширину і товщину фольги, була вирішена проблема дозованої подачі цих елементів в зварювальну ванну. Як показали дослідні зварювання, про-

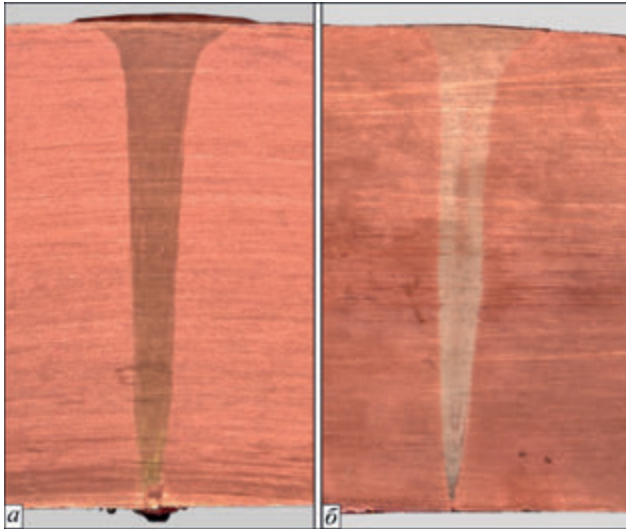


Рис. 4. Формування поперечного перетину шва з легуючими проставками при ЕПЗ в нижньому положенні вертикальним електронним пучком марки міді М1 ($\times 5$): а – фольга алюмінію марки АД0 товщиною $\delta = 0,04$ мм; б – фольга титану марки ВТ1-00 товщиною $\delta = 0,05$ мм. Режим ЕПЗ: $U_{\text{приск.}} = 60$ кВ; $I_{\text{п}} = 197$ мА; $v_{\text{зв}} = 7,5$ мм/с; $+\Delta I_{\text{ф}} = 5$ мА; $I_{\text{роб}} = 200$ мм; $D = 1,5$ мм



Рис. 5. Формування металу шва в продольному перетині по вісі з міді марки М1 довжиною 100 мм при ЕПЗ у нижньому положенні по стику ($\times 1,5$): а – без проставки; б – з проставкою з ВТ1-00 товщиною $\delta = 0,05$ мм. Режим ЕПЗ: $U_{\text{приск.}} = 60$ кВ; $I_{\text{п}} = 197$ мА; $v_{\text{зв}} = 7,5$ мм/с; $+\Delta I_{\text{ф}} = 5$ мА; $I_{\text{роб}} = 200$ мм; $D = 1,5$ мм

цес ЕПЗ міді з застосуванням легуючих вставок з алюмінію і титану характеризується високою гідродинамічною стабільністю зварювальної ванни і відсутністю розбризкування рідкого металу, що забезпечує задовільне формування лицьового валика шва і стабільність глибини проплавлення по довжині шва (рис. 4).

При складі в металі шва алюмінію або титану в межах 0,1 мас. % і більше величина пористості може бути доведена до мінімального значення (менше 10 мм² на довжині шва 100 мм), а шви по всій довжині матимуть щільну макроструктуру (рис. 5).

Необхідно відзначити, що мікролегування шва, яке при цьому відбувається, дозволяє, з одного боку, підвищити механічні властивості зварних з'єднань, з іншого боку, призводить до зниження теплопровідності [15] і зменшення електропровідності [16].

Висновки

1. Застосування розгортки електронного пучка по колу діаметром до $D = 1,5$ мм при ЕПЗ марки міді М1 товщиною $\delta = 18$ мм, з прискорюючою напругою $U_{\text{приск.}} = 60$ кВ забезпечує формування зварного шва без кратерів і розбризкування металу в приосьовій зоні.

2. Встановлено, що при ЕПЗ марки міді М1 товщиною $\delta = 18$ мм оптимальна швидкість зварювання знаходиться в діапазоні $v_{\text{зв}} = 6 \dots 8$ мм/с.

3. Металургійна обробка зварювальної ванни за допомогою вставок з алюмінієвої і титанової фольги при ЕПЗ міді М1 товщиною $\delta = 18$ мм усуває схильність до утворення пір в металі шва.

Список літератури

1. Кайдалов А.А., Назаренко О.К. (1973) Некоторые вопросы теории электронно-лучевой сварки. *Электрон. обраб. материалов*, **3**, 9–13.
2. Шилов Г.А., Акопьянц К.С., Касаткин О.Г. (1983) Влияние частоты и диаметра круговой развертки электронного пучка на проплавление металла при ЭЛС. *Автоматическая сварка*, **8**, 25–28.
3. Рыжков Ф.Н., Башкатов А.В., Закомолдин А.Ф. и др. (1973) Сварка бронзы Бр.Х0,8 и стали ЭИ811 колеблющимся электронным пучком. *Там же*, **5**, 56–58.
4. Johnson, L.D. (1970) Some observation on the electron-beam Welding of copper. *Weld. J.*, **49**, 2, 55–60.
5. Аношин В.А., Илюшенко В.М., Бондаренко А.Н. и др. (2014) Комплексная оценка влияния основных примесей на свариваемость меди. *Автоматическая сварка*, **11**, 27–30.
6. Патон Б.Е., Назаренко О.К., Нестеренков В.М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия. *Там же*, **5**, 3–7.
7. Нестеренков В.М., Кравчук Л.А., Архангельский Ю.А. и др. (2015) Электронно-лучевая сварка камеры среднего давления газотурбинного двигателя. *Там же*, **12**, 31–35.
8. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка.
9. Скрыбинский В.В., Нестеренков В.М., Русиник М.О. (2020) Электронно-променеве зварювання з програмуванням розподілу густини потужності променя. *Автоматичне зварювання*, **1**, 51–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.01.07>
10. Нестеренков В.М. (2003) Особенности капиллярных волн в парогозовом канале при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины. *Автоматическая сварка*, **4**, 8–13.
11. Агарков В.Я. (1980) Электронно-лучевая сварка меди (Обзор). *Там же*, **11**, 42–43.
12. Назаренко О.К., Агарков В.Я., Иконников В.И. (1986) Влияние способа обработки кромок на образование пор в шве при электронно-лучевой сварке. *Там же*, **2**, 21–25.
13. Гончаров А.Н., Кривошея В.Е. (1980) Влияние добавок легирующих элементов на свариваемость меди. *Актуальные проблемы сварки цветных металлов*. Киев, Наукова думка, сс. 221–225.
14. Илюшенко В.М., Аношин В.А., Бондаренко А.Н. и др. (1980) Исследование влияния примесей и ряда легирующих элементов на образование трещин при сварке меди. *Там же*, сс. 217–221.
15. Колачев Я.Л., Ливанов В.А., Елагин В.И. (1981) *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. Москва, Металлургия.
16. Si, L., Zhou, L., Zhu, X. et al. (2016) Microstructure and property of Cu–2,7Ti–0,15Mg–0,1Ce–0,1Zr alloy treated with a combined aging process. *Mater. Sci. Eng. A* **650**, 345–353.

References

1. Kajdalov, A.A., Nazarenko, O.K. (1973) Some problems of theory of electron beam welding. *Elektron. Obrab. Materialov*, **3**, 9-13 [in Russian].

2. Shilov, G.A., Akopyants, K.S., Kasatkin, O.G. (1983) Influence of frequency and diameter of electron beam circular scan on metal penetration in EBW. *Avtomatch. Svarka*, **8**, 25-28 [in Russian].

3. Ryzhkov, F.N., Bashkatov, A.V., Zakomoldin, A.F. et al. (1973) Welding of bronze Br.Kh0.8 and steel EI811 with oscillating electron beam. *Ibid.*, **5**, 56-58 [in Russian].

4. Johnson, L.D. (1970) Some observation on the electron-beam welding of copper. *Weld. J.*, **49**, **2**, 55-60.

5. Anoshin, V.A., Ilyushenko, V.M., Bondarenko, A.N. et al. (2014) Integrated evaluation of effect of main impurities on weldability of copper. *The Paton Welding J.*, **11**, 24-27.

6. Paton, B.E., Nazarenko, O.K., Nesterenkov, V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of the gun and workpiece. *Ibid.*, **5**, 2-5.

7. Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A., Arkhangelsky, Yu.A. et al. (2015) Electron beam welding of medium-pressure chamber of gas turbine engine. *Ibid.*, **12**, 29-33.

8. Nazarenko, O.K., Kajdalov, A.A., Kovbasenko, S.N. et al. (1987) Electron beam welding. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

9. Skryabinskyi, V.V., Nesterenkov, V.M., Rusynyk, M.O. (2020) Electron beam welding with programming of beam power density distribution. *The Paton Welding J.*, **1**, 49-53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.01.07>

10. Nesterenkov, V.M. (2003) Special features of capillary waves in the vapour-gas channel in electron beam welding of thick metal. *Ibid.*, **4**, 7-12.

11. Agarkov, V.Ya. (1980) Electron beam welding of copper (Review). *Avtomatch. Svarka*, **11**, 42-43 [in Russian].

12. Nazarenko, O.K., Agarkov, V.Ya., Ikonnikov, V.I. (1986) Influence of method of edge preparation on weld pore formation in electron beam welding. *Ibid.*, **2**, 21-25 [in Russian].

13. Goncharov, A.N., Krivosheya, V.E. (1980) *Effect of alloy additives on weldability of copper. In: Current problems of welding of nonferrous metals*. Kiev, Naukova Dumka, 221-225 [in Russian].

14. Ilyushenko, V.M., Anoshin, V.A., Bondarenko, A.N. et al. (1980) Investigation of influence of additives and a number of alloying elements on crack formation in welding of copper. *Ibid.*, 217-221 [in Russian].

15. Kolachev, Ya.L., Livanov, V.A., Elagin, V.I. (1981) *Metals science and heat treatment of nonferrous metals and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

16. Si, L., Zhou, L., Zhu, X. et al. (2016) Microstructure and property of Cu-2,7Ti-0,15Mg-0,1Ce-0,1Zr alloy treated with a combined aging process. *Mater. Sci. Eng.: A650*, 345-353.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL AND METALLURGICAL FACTORS ON FORMATION OF COPPER WELDED JOINTS IN ELECTRON BEAM WELDING

V.M. Nesterenkov, L.A. Kravchuk, M.O. Rusynyk

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

The influence of technological and metallurgical factors on the formation of welded joints in electron beam welding of M1 copper grade with the thickness $\delta = 18$ mm by a vertical electron beam in the flat position in a one pass was studied. The system of a computer control of the process of electron beam welding in the installation UL-209M allows performing cleaning of the adjacent joint zone from the remnants of contaminants and oxides using a low-power electron beam focused on the metal surface in a single technological cycle. The use of high-speed local scanning of the electron beam in a circle allowed a significant reduction in the temperature in the central part of the welding pool and, thus, eliminated burnouts and splashes of weld metal. It was established that the optimal welding speed at accelerating voltage $U_{acc} = 60$ kV is in the range $v_w = 6 \dots 8$ mm/s. Metallurgical treatment of welding pool with the inserts of aluminium and titanium foil eliminates the tendency to formation of pores in the weld metal. 16 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: electron beam welding, electron beam, computer control, circular scanning, penetration depth, input energy, welding speed, facial bead width, porosity

Надійшла до редакції 30.11.2020

ПЕРЕДПЛАТА 2021

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	пів року	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.
**«The Paton Welding Journal» – переклад журналу «Автоматичне зварювання» на англійську мову.

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агентцій «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» та у видавництвах. Передплата через видавництва 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 2020 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2018 рр.

НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОГО ПРИБОРУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ

О.С. Косторной, М.О. Лактіонов, К.Ю. Холоша

Акціонерне товариство «Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування». 40003, м. Суми, вул. 2-га Залізнична, 2. E-mail: laktionov@vniiaen.sumy.ua

Нівелювання осьових зусиль на вал відцентрових насосів залежить від характеристик торцевих щілинних кілець розвантажувального пристрою, що визначають стабільність щілинного зазору між ними. У даній роботі представлено способи підвищення зносостійкості поверхонь, що сполучаються між щілинними кільцями, шляхом наплавлення на них покриттів композиційного сплаву, армованого карбідами вольфраму (реліту). Показано переваги та недоліки електродугового, плазово-порошкового та пічного наплавлення щілинних кілець, а також відзначено істотне поліпшення процесу при заміні колотого реліту на сферичний. Бібліогр. 6, рис. 4.

Ключові слова: щілинні кільця, карбіди вольфраму (реліт), зносостійкість, наплавлення електродугове, плазово-порошкове та пічне

Особливістю роботи відцентрового насоса є наявність осьового зусилля, що діє на вал робочого колеса. У високонапірних багатоступеневих відцентрових насосах одним із способів урівноваження великих осьових сил, що впливають на ротор, є застосування саморегулюючого автоматичного розвантажувального пристрою – гідроп'яти. Вона складається з двох сполучених вузлів: обертального на валу ротора розвантажувального диска і «подушки», закріпленої нерухомо в корпусі насоса. Урівноваження осьових сил відбувається в процесі саморегулювання щілинного торцевого зазору між розвантажувальним диском і «подушкою» гідроп'яти. Принцип його дії полягає в наступному: при осьовому переміщенні ротора змінюється щілинний торцевий зазор між розвантажувальним кільцем і «подушкою» гідроп'яти, що тягне за собою зміну перетікання рідини в гідроп'яті і появу тиску рідини на ротор в протилежному осьовому напрямку. Таким чином, вирівнюються осьові зусилля на ротор і його місце розташування відновлюється.

Функціональна надійність гідравлічного розвантажувального пристрою залежить від стабільності розмірів торцевого щілинного зазору між поверхнями розвантажувального диска та «подушки» гідроп'яти. Оптимальний зазор (0,06...0,10 мм) забезпечує мінімальні протікання рідини, що перекачується, та незначне зниження коефіцієнта корисної дії (к.к.д.) насоса [1].

В процесі експлуатації насосів на щілинний зазор і якість поверхонь, що сполучаються в зоні зазору, впливають такі чинники:

- при пусках і зупинках насоса зазор може зменшитися до нуля, що призведе до зносу поверхонь контакту;

- ймовірність контакту ротора зі статором через високий рівень вібрацій або деформацій ро-

тора при експлуатації, особливо в умовах перехідних режимів, може привести до задирання або схоплення металу контактуючих поверхонь;

- наявність в рідині, що перекачується, зважених часток призводить до ерозійного зносу поверхонь щілинного зазору;

- специфічне середовище в рідині може викликати корозійне зношення на поверхнях деталей в зоні щілинного зазору.

Знос деталей в зоні торцевого щілинного зазору викликав необхідність заміни вузлів гідроп'яти. Тому раціональним конструктивним рішенням стало застосування в зоні торцевого щілинного зазору змінних, так званих щілинних кілець, які закріплюються на розвантажувальному диску і «подушці» гідроп'яти.

З метою мінімізації впливу зазначених факторів на торцевий зазор гідроп'яти в насособудуванні особлива увага приділяється вибору матеріалів для виготовлення щілинних кілець. Ці матеріали повинні мати високу стійкість проти задирання і можливого схоплювання поверхонь контакту. Втрата металу в зоні зазору в результаті корозії або ерозійної корозії повинна бути незначною при експлуатації, щоб уникати збільшення зазору, зниження к.к.д. насоса та демпфірування ротора.

Твердість кілець в зоні щілинного зазору можна регулювати в широкому діапазоні, застосовуючи не тільки різні основні матеріали, а і використовуючи різні способи наплавлення зносостійкого поверхневого шару [2, 3]. Акціонерне товариство «Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування» (АТ «ВНДІАЕН») в своїх розробках відцентрових насосів для нафтопромислового комплексу використовував, в основному, дугове наплавлення щілинних кілець сплавами на основі кобальту типу Стелліт 6. Наприклад,

таке наплавлення використовувалось при виготовленні серійних відцентрових насосів типу ЦНС-180 для закачування води в нафтові пласти з метою підтримання пластового тиску. Однак на багатьох родовищах, де використовуються досить агресивні та забруднені твердими частками пластові води, кільця гідроп'яти, які були виготовлені із сталі 12X18H12M3T та наплавлені Стеллітом 6, мали при експлуатації обмежений ресурс експлуатації.

Відомо [4], що при роботі з рідинами, які містять абразивні частки, з успіхом використовуються кільця з карбідів вольфраму. Також при наплавленні бурових труб, які працюють в умовах інтенсивного зношування, високу ефективність показав композиційний сплав на основі литих карбідів вольфраму (далі реліт). У зв'язку зі зростаючими вимогами до надійності роботи гідроп'яти насосів були виконані дослідження по наплавленню щілинних кілець торцевого ущільнення композиційним сплавом, армованим релітом (в подальшому наплавлення релітом).

Процес наплавлення релітом має дві стадії: розведення зварювальної ванни на основі хромонікелевого сплаву (матриці) і одночасно подача у зварювальну ванну зерен реліту. Зерна реліту мають велику твердість, високі показники температури плавлення і питомої ваги. Щілинні кільця торцевого ущільнення наплавляються в нижньому положенні, що істотно спрощує армування релітом матриці.

Спочатку роботи з наплавленням релітом були виконані стосовно до насосів ЦНС-180 на кільцях зі сталі марки 12X18H12M3T діаметром 250/150 мм завтовшки 27 мм. Для експериментів і впровадження процесу електродугового наплавлення використовували робототехнічний комплекс «Limat-RT280», матеріал матриці – зварювальний дріт Св-07Х25Н13 діаметром 1,6 мм, армуюча фаза – реліт колотий марки «З» по ТУ У 322-19-005-96.

В процесі відпрацювання технології електродугового наплавлення вирішені наступні питання:

- розроблено дозуючий пристрій подачі колотого реліту;
- визначено місце і кут подачі реліту в зварювальну ванну;
- оптимізована кількість реліту в композиційному сплаві;
- обрані оптимальні режими наплавлення.

Вплив різних факторів на якість наплавлення оцінювали на макрошліфах за кількістю реліту на

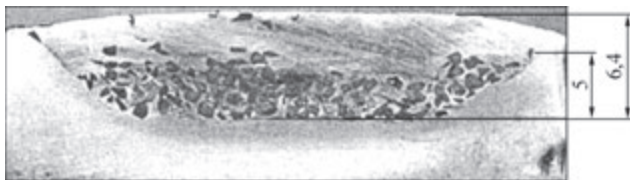


Рис. 1. Характерна макроструктура наплавленого металу

робочій поверхні щілинних кілець і по відсутності дефектів в наплавленому металі (рис. 1).

Виконані експериментальні роботи дозволили забезпечити:

- вміст реліту в наплавленому металі понад 40 % після механічної обробки наплавленого шару на висоту 2...3 мм;
- хорошу змочуваність зерен реліту хромонікелевим металом в зварювальній ванні;
- відсутність тріщин та інших дефектів в наплавленому металі.

Розроблена технологія успішно була впроваджена і дозволила значно збільшити зносостійкість щілинних кілець розвантажувального пристрою відцентрових насосів в умовах забезпечення вмісту реліту на робочих поверхнях не менше 40 %.

Однак колотий реліт має ряд недоліків, пов'язаних з технологією його отримання. Значна частина зерен реліту відрізняється неоднорідністю складу, нерівновісністю і загостреністю форм, а також наявністю тріщин. В кінцевому підсумку це негативно відбивається на працездатності наплавлених композиційних шарів [5]. Ця проблема була вирішена після промислового освоєння технології одержання реліту сферичної форми. Такий реліт має сферичну форму заданого гранулометричного складу, що забезпечує максимальну сипкість і відповідно надійну роботу дозуючих пристроїв. Стабільний стехіометричний склад, дрібноглобулярна структура сприяють підвищенню твердості і міцності сферичних гранул карбиду вольфраму [5]. Ці чинники зумовили широке застосування сферичного реліту для плазово-порошкового наплавлення різних зносостійких деталей.

Плазово-порошкове наплавлення щілинних кілець розвантажувального пристрою насосів виконували на роботизованому спеціалізованому обладнанні фірми «Плазма-Майстер» (рис. 2). Наплавлення виконували на кільце зі сталі 08Х21Н6М2Т розмірами діаметром 358/278 товщиною 30 мм. Зварювальні матеріали: сферичний карбід вольфраму марки КВС-1 по ТУУ 24.1-19482355-001, матрична зв'язка – порошок марки ПГ-СР2 ГОСТ 21448-75. Самофлюсуючий сплав ПГ-СР2 на нікелевій основі має низьку температуру плавлення (1000...1100 °С), добре змочує зерна реліту і має високу зносостійкість [6].

В процесі відпрацювання технології наплавлення визначили оптимальні режими процесу, схему подачі реліту та матричного порошку. Вміст реліту в суміші підтримували близько 50 об. %. За даними роботи [6] перевищення зазначеного оптимального вмісту реліту змушує суттєво збільшувати струм наплавлення, що призводить до помітного розчинення частинок реліту, охрупчуванню



Рис. 2. Установка для плазово-порошкового наплавлення РМ-302

матриці і, як наслідок, зниження зносостійкості. При цьому мікротвердість нерозчинених частинок реліту – 180...190 МПа, для напіврозчинених частинок реліту вона становить 130...160 МПа [6]. Макротвердість наплавлення після шліфувки її поверхні на робочу висоту (2...3 мм) знаходиться в межах *HRC* 50...56. Вміст реліту на робочій поверхні наплавленого металу більше 50 об. % (рис. 3). Розроблена технологія забезпечує високу якість наплавлених кілець (рис. 4) і успішно реалізована в насособудуванні.

Наведені вище технології наплавлення дозволяють отримати на робочій поверхні щілинних кілець композиційні шари з армуванням карбідами вольфраму в обсязі 40...60 об. %. Крім цих способів наплавлення при отриманні композиційних шарів в даний час використовується пічний метод наплавлення. При пічному напавленні зерна реліту розташовані в композиційному шарі рівномірно і практично відсутнє їх часткове підплавлення. Для пічного наплавлення щілинних кілець використовували зерновий реліт по

ТУ У 322-19-005-96, а в якості зв'язки хромопівелеві порошки по ТУ У 323-19-004-96. Робоча товщина покриття становить 1,5...2,0 мм. Об'ємна частка зерен реліту в зносостійкому покритті знаходиться в межах 80...90 %.

У вітчизняному насособудуванні застосовуються всі три способи нанесення на щілинні кільця композиційного армованого релітом шару: електродугове, плазово-порошкове та пічне наплавлення. Вибір способу наплавлення визначається можливостями виробництва, умовами експлуатації насосів та економічними факторами. У технологічному процесі електродугового наплавлення щілинних кілець використовується, в основному, універсальне зварювальне обладнання: малогабаритний маніпулятор, зварювальна головка з коливаючим механізмом та дозуючий пристрій для подачі реліту. Плазово-порошкове наплавлення з самого початку впроваджено на обладнанні фірми «Плазма-Майстер» з використанням сферичного реліту. Вартість сферичного

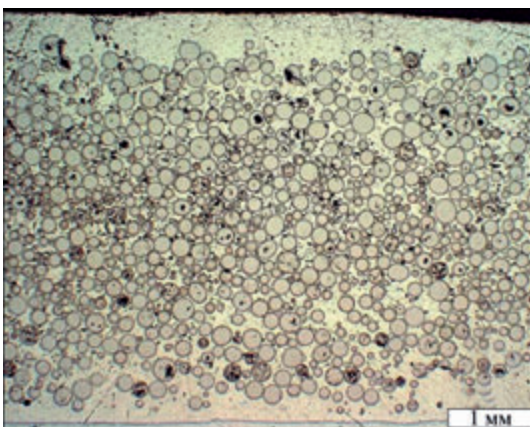


Рис. 3. Мікроструктура металу, наплавленого плазово-порошковим методом з використанням сферичного реліту



Рис. 4. Щілинне кільце, наплавлене плазово-порошковим методом

реліта значно вище колотого, але в цілому переваги застосування даного процесу очевидні:

- стабільність, висока технологічність процесу наплавлення;
- рівномірний розподіл зерен реліту на робочій поверхні щілинних кілець;
- істотне зниження кількості підплавлених зерен реліта;
- матрична зв'язка на нікелевій основі сама по собі має високу зносостійкість;
- відсутність дефектів, властивих зернам колотого реліту.

Композиційний зносостійкий шар, армований сферичним релітом в обсязі не менше 50 об. % при плазово-порошковому напавленні щілинних кілець збільшує ресурс експлуатації насосів, в тому числі в умовах зростаючих навантажень і підвищення корозійного і ерозійного впливу.

Пічне напавлення є достатньо складним технологічним процесом, але воно до переваг плазово-порошкового методу додає важливу властивість композиційного напавленого металу – забезпечує більш щільну упаковку реліту в матричному розплаві. Наявність понад 80 % сферичного реліту на робочій поверхні щілинних кілець значно підвищує їх зносостійкість і дозволяє успішно їх використовувати при експлуатації насосів в жорстких умовах.

В однакових умовах експлуатації насосів ресурс експлуатації торцевих щілинних кілець послідовно значно зростає при застосуванні напавлення спла-

вами на основі кобальту типу Стелліт 6; композиційними сплавами, армованими релітом – електро-дугового, плазово-порошкового та пічного. При цьому значно кращі результати одержані при використанні у якості твердої фази сферичного реліту.

Список літератури

1. Малюшенко В.В., Михайлов О.К. (1981). *Енергетичні насоси. Довідковий посібник*. Москва, Енергоіздат, сс. 23–29.
2. Рябцев І.О., Сенченков І.К. (2013) *Теорія і практика наплавочних робіт*. Київ, Екотехнологія.
3. Косторной О.С., Лактіонов М.О. (2020) Дугове та плазово-порошкове напавлення ущільнювальних поверхонь робочих коліс насосів. *Автоматичне зварювання*, **2**, 57–60. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.10>
4. Gulich, J. *Centrifugal Pumps*, Second Edition (2008, 2010).
5. Жудра О.П. (2014) Наплавлювальні матеріали на основі карбідів вольфраму. *Автоматичне зварювання*, **6-7**, 69–74.
6. Сом О.І. (2004) Плазово-порошкове напавлення композиційних сплавів на базі литих карбідів вольфраму. *Там само*, **10**, 49–54.

References

1. Maliushenko, V.V., Mikhailov, O.K. (1981) *Energy pumps: Refer. book*. Moscow, Energoizdat, pp. 23-29 [in Ukrainian].
2. Ryabtsev, I.O., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Ukrainian].
3. Kostornoy, O.S., Laktionov, M.O. (2020) Arc and plasma-powder surfacing of sealing surfaces of pump impellers. *The Paton Welding J.*, **1**, 57–60. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.10>
4. Gulich, J. (2008, 2010) *Centrifugal Pumps*, Second Ed.
5. Zhudra, A.P. (2014) Tungsten carbide based cladding materials. *Ibid.*, **6-7**, 69–74.
6. Som, A.I. (2004) Plasma-powder surfacing of composite alloys based on cast tungsten carbides. *Ibid.*, **10**, 43-47.

SURFACING PARTS OF UNLOADING DEVICE OF CENTRIFUGAL PUMPS

O.S. Kostornoj, M.O. Laktionov, K.Y. Kholosha

Joint-Stock Company «Research and Design Institute for Atomic and Power Pump-building».

2, 2nd Zheleznodorozhnaya Str., 40003, Sumy, Ukraine. E-mail: laktionov@vniiaen.sumy.ua

Leveling of axial forces on the shaft of centrifugal pumps depends on the characteristics of end slotted rings of the unloading device that determine the stability of the slit clearance between them. This work presents the methods to improve the wear resistance of mating surfaces between the slotted rings, by their surfacing with coatings from a composite alloy reinforced by tungsten carbides. The advantages and disadvantages of electric arc, plasma-powder and furnace surfacing of slotted rings are shown, and a significant improvement of the process at replacement of chipped tungsten carbide by spherical one is noted. 6 Ref., 4 Fig.

Keywords: slotted rings, tungsten carbides, wear resistance, arc surfacing, plasma-powder and furnace surfacing

Надійшла до редакції 10.12.2020

Новая книга

Кусков Ю.М., Рябцев И.А., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. / Под общ. ред. И.А. Рябцева. **Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлодержащих отходов**. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2020. – 288 с.



В книге обобщен опыт ученых ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, других организаций стран СНГ и промышленно развитых стран в области разработки технологий, материалов и оборудования для ЭШН и электрошлаковых процессов рециклинга металлических и металлодержащих отходов, т.е. возвращения отходов производства в круговорот «производство – потребление». Рассмотрены проблемы физико-химического взаимодействия электродного и присадочного металла и шлака и особенности этого взаимодействия в упомянутых электрошлаковых процессах. Описаны технологии и техника основных способов ЭШН и рециклинга, приведены примеры их промышленного применения. Рассмотрены дефекты, которые появляются при ЭШН в зоне сплавления и в наплавленном металле, рассмотрены причины их появления, описаны меры по их предупреждению. Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занятых в области наплавочного и сварочного производства. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам технических университетов.

ГІГІЄНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВІТРЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ МІДІ ТА ЇЇ СПЛАВІВ (Огляд)

О. М. Безушко¹, О. Г. Левченко², Т. Б. Майданчук¹, А. О. Лук'яненко¹, О. М. Гончарова¹

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

²НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: mail@kpi.ua

Приведено літературний огляд шкідливих речовин, що утворюються під час дугового зварювання міді та її сплавів. Розглянуто літературні дані про дослідження виділень зварювальних аерозолів при зварюванні міді та мідних сплавів. Показано, що для створення нових марок зварювальних матеріалів, які б задовольняли не тільки їх зварювально-технологічні, а й санітарно-гігієнічні характеристики, необхідно продовжити дослідження хімічного складу і рівнів виділень зварювальних аерозолів з використанням сучасних стандартизованих міжнародних методик. Бібліогр. 13, табл. 1.

Ключові слова: мідь, зварювання, латуні, бронзи, зварювальний аерозоль, шкідливі речовини, токсичність

За обсягом світового виробництва і споживання мідь та її сплави займає третє місце після заліза і алюмінію. Такий широкий попит пов'язаний з властивостями даного металу та його сплавів [1]. Мідь – пластичний метал з високою теплопровідністю і низьким електроопором, мідні сплави мають високі антифрикційні властивості, а також високу корозійну стійкість, в тому числі в морській воді. Це визначає широке застосування міді та її сплавів в електротехнічній та хімічній промисловості, в суднобудуванні і криогенній техніці, у приладобудуванні, металургійній промисловості та інших галузях виробництва. Найбільш широкоживаними способами зварювання та наплавлення міді та її сплавів є дугові види зварювання (ручне дугове зварювання покритими електродами (ММА), зварювання в захисних газах TIG та MIG, зварювання під флюсом SAW). Застосування даних процесів пов'язано з шкідливими та небезпечними виробничими факторами, які діють на зварника.

Незважаючи на значно нижчі показники виділень шкідливих речовин [2] при зварюванні в захисних газах TIG, MIG та особливо під флюсом (SAW), найчастіше в промисловості застосовується процес ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА), який супроводжується значним виділенням зварювального аерозолу (ЗА) в зону дихання зварника (при ручному дуговому зварюванні покритими електродами алюмінієвої бронзи питомі виділення аерозолу вищі в 2...4 рази, а вміст оксидів марганцю вище в 1,5...2,0 рази, ніж при механізованому зварюванні в середовищі аргону [3]). У ЗА можуть бути присутні такі хімічні елементи як мідь, оксиди марганцю, фториди,

алюміній, оксиди цинку, свинець, фосфор, аміак та інші. ЗА має подразнюючу дію на організм людини і в певних випадках може викликати онкологічні захворювання. Зокрема фториди та оксиди марганцю викликають запалення слизової оболонки та нервові розлади, свинець – нудоту, шлункові, кишкові, нервові та ниркові хвороби, мідь лихоманку металевого диму, оксиди алюмінію накопичуються в легенях, оксиди нікелю викликають рак дихальних шляхів [4].

Метою цієї роботи є аналіз існуючих даних про шкідливі речовини, що забруднюють повітря виробничих приміщень під час дугового зварювання і наплавлення міді та її сплавів покритими електродами.

Виконання заходів поліпшення умов праці робітників зварювального виробництва базується на аналізі даних про хімічний склад, рівні виділень і токсичність ЗА. Для цього проводиться первинна санітарно-гігієнічна оцінка зварювальних матеріалів методом уловлювання ЗА і визначення їх кількості та хімічного складу. При цьому використовують такі санітарно-гігієнічні показники, як інтенсивність утворення (г/хв) і питоме виділення ЗА (г/кг зварювального матеріалу). Крім того, для оцінювання токсичності ЗА чи ступеня впливу на організм використовують такі показники: гранична допустима концентрація (ГДК) шкідливих речовин, необхідний об'єм повітря для розбавлення до ГДК, виражений в м³/год (в одиницю часу) за міжнародною методикою [5]. У вітчизняній практиці використовують показник повітрообміну загальною обмінною вентиляції (тобто об'єм повітря, яке необхідно подати у виробниче приміщення

Безушко О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-6148-1675>, Левченко О.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-9737-7212>

Майданчук Т.Б. – <https://orcid.org/0000-0002-2826-8514>, Лук'яненко А.О. – <https://orcid.org/0000-0002-0632-4984>

Гончарова О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-5213-6300>

© О.М. Безушко, О.Г. Левченко, Т.Б. Майданчук, А.О. Лук'яненко, О.М. Гончарова, 2021

для розбавлення шкідливих речовин ЗА до ГДК), виражений в м³/кг зварювального матеріалу.

Відомості про виділення ЗА і газів при дуговому зварюванні міді, бронзи, латуні, а також мідно-нікелевих сплавів дуже обмежені, а узагальнені дані відсутні. ГДК деяких шкідливих хімічних елементів, які можуть бути у складі ЗА, що утворюються при дуговому зварюванні міді та її сплавів, наведено в таблиці. Ці дані необхідні для розрахунків необхідного повітрообміну механічної вентиляції.

Покриті електроди для зварювання міді виготовляються з витягнутого (холоднодеформованого) дроту або круглих витягнутих і пресованих прутків. Хімічний склад зварювального дроту та прутків з міді й сплавів на мідній основі, що регламентуються стандартом [6], залежно від марки може мати різну кількість легуючих елементів та домішок (Si, Mn, Ag, Cr, Bi, Sb, As, Fe, Ni, Pb, Sn, Zn, S, P, O₂). При зварюванні міді найбільш широкоживаними є електроди марки «Комсомолец-100». Основною токсичною складовою ЗА, яка визначає необхідний повітрообмін, є марганець. За ступенем впливу на організм людини марганець відноситься до 2-го класу небезпеки, тобто є високотоксичним. Вміст оксидів марганцю (в перерахунку на Mn) у ЗА при розплавлен-

ні електродів «Комсомолец-100» складає 3,9 г/кг, а гранично допустима концентрація в повітрі робочої зони – 0,3 мг/м³. Згідно з гігієнічними регламентами хімічних речовин у повітрі робочої зони [7] гранично допустима концентрація міді і її оксидів в повітрі на рівні органів дихання не повинна перевищувати 1 мг/м³. Кількість повітря, необхідного для розчинення аерозолі до ГДК при зварюванні електродами «Комсомолец-100» повинна бути не менше 13000 м³/кг.

Широке застосування в промисловості знаходять бронзи: алюмінієві (4,0...11,5 % Al), олов'яні (2...10 % Sn) [8, 9], марганцеві (4,5... 5,5 % Mn), кремнієві (0,5...3,5 % Si), берилієві (1,9...2,2 % Be) та хромисті (0,4...1% Cr).

У роботі [3] наведено результати випробувань електродів для зварювання складнолегованих бронз системи Cu–Al–Ni–Mn–Fe. Випробовувалися дві марки електродів ЛКЗ-АБ й ЛКЗ-АБН. Електроди марок ЛКЗ-АБ і ЛКЗ-АБН відрізняються між собою тим, що перші виготовляються зі стрижнями з катаних прутків бронзи БрАНМцЖ8-3-4-1, а другі зі стрижнями з дроту БрАМц9-2, при цьому легування наплавленого металу нікелем і залізом проводиться через покриття. Питомі виділення аерозолі при легуванні

ГДК шкідливих газів і аерозолів у повітрі зварювальних цехів при дуговому зварюванні міді та її сплавів [7]

Номер п/п	Назва речовини	Величина ГДК, мг/м³	Переважаючий стан в умовах виробництва	Клас небезпеки	Особливості дії на організм
1	Діоксид азоту	2	п	3	О
2	Оксид азоту	5	п	3	О
3	Озон	0,1	п	1	О
4	Солі фтористоводневої кислоти (за F): фториди Al, Mg, Ca, Cu, Sr	2,5/0,5	а	3	
5	Марганець в ЗА при його вмісту:				
	а) до 20 %	0,2	а	2	
	б) від 20 %	0,1	а	2	
6	Оксиди марганцю (в перерахунку MnO ₂):				
	а) аерозоль дизентиграції	0,3	а	2	
	б) аерозоль конденсації	0,05	а	1	
7	Нікель, оксиди нікелю, сульфід і суміші з'єднань нікеля	0,05	а	1	К, А
8	Фтористий водень (в перерахунку на F)	0,5/0,1	п	1	О
9	Мідь	1/0,5	а	2	
10	Оксид магнію	4	а	4	
11	Оксид цинку	0,5	а	2	
12	Алюміній та його сплави (в перерахунку на Al)	2	0	3	Ф
13	Берилій та його з'єднання (в перерахунку на Be)	0,001	а	1	К, А
14	Свинець і його неорганічні з'єднання (по свинцю)	0,01/0,005	а	1	

Примітка. 1. Якщо в графі «Величина ГДК» наведені дві величини, це означає, що в чисельнику максимальна, а в знаменнику – середньозмінна ГДК. 2. Умовні позначення: п – пари і/або гази; а – аерозоль; а+п – суміш парів і аерозолів. 3. О – речовини з гостро направленим механізмом дії, що потребують автомеханічного контролю за їх вмістом в повітрі. А – речовини, здатні викликати алергічні захворювання у виробничих умовах. К – канцерогени. Ф – аерозолі переважно фіброгенної дії.

наплавленого металу через покриття (електроди ЛКЗ-АБН) в 2 рази більше, ніж без легування (електроди ЛКЗ-АБ). Тому застосування електродів з легуючими покриттями при зварюванні і наплавленні бронз з санітарно-гігієнічного боку недоцільно. Випробовувалися також дві марки електродів: для зварювання бронзи «Ніколіум» (БрАНЖМц9-5-4-1,5) та для зварювання бронзи «Суперстон» (БрАМцЖН8-12-3-2). Стрижні електродів виготовлялися з прутків однакового складу з основним металом (відповідно), а на стрижні наносилось покриття основного виду. Слід зазначити, що незважаючи на наявне розходження в складі електродних стрижнів БрАНМцЖ8-3-4-1 й БрАНЖМц9-5-4-1,5 та застосованих режимів зварювання, отримані приблизно однакові середні значення загального виділення ЗА (21,3 та 25,0 г/кг).

Дослідження санітарно-гігієнічних характеристик електродів, розроблених Санкт-Петербурзьким державним технічним університетом для зварювання алюмінієвих складнолегованих бронз (марок ЛПІ-73, ЛПІ-48-АБ2, ЛПІ-13, ЛПІ-ЛКЗ-АЦ та ЛПІ-ЛКЗ-АЦК), проведені лабораторією гігієни праці та ергономіки Науково-дослідного інституту охорони праці [3]. Слід зазначити, що питомі виділення ЗА при зварюванні усіма випробуваними марками електродів складають 18...25 г/кг, тобто змінюються у відносно невеликих межах незважаючи на істотні відмінності у складі і виді покриттів, а також застосовуваних режимів зварювання. Виняток становлять електроди марки ЛКЗ-АБН, в яких легування наплавленого металу нікелем і залізом здійснюється через покриття, при цьому питомі виділення аерозолі досягають 40 г/кг, тобто збільшуються в 1,5...2,0 рази. Необхідність легування металу зварних швів і наплавлень через стрижні електродів, а не через покриття для зниження рівня утворення зварювального аерозолі та покращення санітарно-гігієнічних характеристик електродів для ручного дугового зварювання не тільки кольорових, але і чорних металів рекомендується в роботі [3].

Отримані результати гігієнічної оцінки електродів для зварювання алюмінієвих бронз з нелегуючим покриттям дозволяють зробити висновок, що середнє значення питомих виділень аерозолі становить 20 г/кг витрачених електродів. Великі розбіжності щодо концентрації зварювального аерозолі (ЗА) обумовлені різними місцями відбору проб (перед щитком і під щитком зварника), що робить їх несумісними.

За результатами гігієнічної оцінки електродів марки ЛПІ-73 на предмет обґрунтування гігієнічного сертифіката наведено такі дані по концентрації зварювального аерозолі в робочій зоні (мг/м³):

- при вимкненій вентиляції перед щитком зварника – 111,1, а під щитком зварника – 54,6;
- при роботі місцевої витяжної вентиляції перед щитком зварника – 15,7, а під щитком зварника – 3,1.

Порівняння результатів концентрації аерозолі, який виділяється при зварюванні електродами з бронз «Суперстон» і «Ніколіум», дозволяє припустити, що проби пилу відбиралися під щитком зварника при вимкненій витяжній вентиляції, при цьому отримані результати приблизно однакові (мг/м³): електроди ЛПІ-73 – 54,6; електроди «Суперстон» – 39,0; електроди «Ніколіум» – 41,0.

Дугове зварювання латуней покритими електродами відрізняється особливо несприятливими санітарно-гігієнічними умовами через випаровування цинку. За ступенем впливу на організм людини окис цинку відноситься до 2-го класу небезпеки, тобто є небезпечною речовиною. Відповідно до вимог гранично допустима концентрація ZnO в повітрі робочої зони не повинна перевищувати 0,5 мг/м³. Разом з цим питомі виділення аерозолів і газів при дуговому зварюванні латуней досліджені значно менше, ніж при зварюванні інших кольорових металів (наприклад, бронз і алюмінієвих сплавів) і такі дані в довідковій і технічній літературі практично відсутні. Відзначено, що сумарне виділення аерозолі при зварюванні латунними електродами, стрижні яких виготовлені з латуні марки ЛМцЖ55-3-1 досягає 211 г/кг розплавлених електродів (покриття і режим зварювання не вказані). Це в 5 разів більше, ніж при зварюванні сталей найбільш токсичними електродами з покриттями кислого виду (до 40 г/кг) та в 10...20 разів більше, ніж при зварюванні електродами з покриттями основного, целюлозного і рутилового видів (10...20 г/кг). Цілком очевидно, що це переважно обумовлено випаровуванням цинку, температура кипіння якого (907 °С) близька до температури плавлення латуні.

Висока частка участі оксидів цинку у складі ЗА, що утворюється при дуговому зварюванні латуні підтверджується даними роботи [3]. Навіть при азотно-дуговому зварюванні латуні Л90 з міддю М3р неплавким вольфрамовим електродом з використанням присадкового дроту БрКМц3-1 загальна кількість виділеного аерозолі склала 48 г/кг, а вміст оксиду цинку в ньому (ZnO) 13,9 г/кг, тобто 30 %. Слід враховувати, що така велика кількість ZnO у складі аерозолі утворилася при розплавленні тільки основного металу. За розрахунками авторів для доведення вмісту токсичних елементів до гранично допустимої концентрації, питомий повітрообмін у даному випадку повинен становити 27 200 м³/кг. При розплавленні латунних електродів і основного металу

загальна кількість, що утворюється, аерозолі і вміст у ньому ZnO збільшується в кілька разів. Тому відповідно слід збільшити необхідний повітрообмін припливно-витяжної вентиляції для забезпечення ГДК.

Проводились дослідження санітарно-гігієнічних характеристик електродів марок ЛПИ-ЛКЗ-АЦ та ЛПИ-ЛКЗ-АЦК, призначених для зварювання бронзи з високою демпфіруючою здатністю системи Cu-Al-Zn (БрАЦКЖ8-6-0,3-0,3). Стрижні електродів марки ЛПИ-ЛКЗ-АЦ виготовляються з прутків однакового складу з основним металом, що містить в середньому 6 % цинку. Стрижні електродів ЛПИ-ЛКЗ-АЦК виготовляються з бронзи БрАМц9-2, на які наноситься нелеговане покриття, а цинк вводиться в наплавлений метал через спіраль або оболонку з латуні Л63 або ЛК62-0,5, надіту на покриту частину електрода. Гігієнічна оцінка аерозолів обох марок електродів проводилася за вмістом в них оксидів міді і цинку (загальна запиленість не визначалась).

Відносно низькі температури плавлення і кипіння цинку при дуговому зварюванні покритими електродами (420 та 907 °C відповідно) призводять до його втрат на ЗА і розбризкування на стадії краплі від 30 до 60 %. Це обумовлено високим вмістом оксиду цинку в ЗА (9...11 г/кг), що утворюється. При цьому вміст оксидів міді в ЗА при зварюванні електродами марок ЛПИ-ЛКЗ-АЦ та ЛПИ-ЛКЗ-АЦК становить 6,1...6,5 г/кг, тобто знаходиться на рівні вмісту оксидів міді в аерозолі, що виділяється при зварюванні електродами марок ЛКЗ-АБ та ЛКЗ-АБН (5,25...7,55 г/кг).

У технічній літературі мало інформації про санітарно-гігієнічні характеристики дугового зварювання олов'яних бронз. В ІЕЗ ім. Е.О. Патона розроблено електроди марки АНБО [10–12]. Їх покриття має специфічний склад, пов'язаний з наявністю в ньому хімічно активних по відношенню до зв'язуючого (рідкого скла) складових солей натрію (гексафторсілікату, гексафторалюмінату та фторидів), а також нетрадиційних металевих складових (олов'яних, мідно-фосфористих порошків). Для дослідження було підготовлено стандартні (натрієві, калієві й змішані натрієві і калієві) дослідні літійвмісні зразки рідкого скла, які надають унікальних властивостей деяким типам електродів [10, 13]. Санітарно-гігієнічні характеристики електродів оцінювали за інтенсивністю утворення V_a і питомим виділенням G_a ЗА. Визначення інтенсивності утворення і питомого виділення ЗА проводили гравіметричним методом. Найбільш низькі рівні виділення ЗА досягаються при зварюванні електродами, виготовленими із застосуванням натрій-літійового скла ($V_a = 0,393$ г/хв, $G_a = 8,71$ г/кг). Близькі до них за виділенням ЗА

електроди, виготовлені на натрієво-калієвому і літійовому зв'язуючому. Найбільш сприятливими за санітарно-гігієнічним показником є електроди на калій і калій-літійовому зв'язуючому. Так, наприклад, інтенсивність утворення і питомі виділення у електродів, виготовлених на калієвому зв'язуючому, відповідно на 22,0 та 23,6 % вище, ніж у електродів на натрій-калієвому склі. Електроди, виготовлені на K-Na і Na зв'язуючих, за санітарно-гігієнічними властивостями займають проміжні положення між двома крайніми групами електродів [4].

Санітарно-гігієнічні характеристики електродів для зварювання мідно-нікелевих сплавів в технічній літературі відсутні.

У берилієвій бронзі найбільш токсичний елемент – це берилій, його ГДК становить 0,001 мг/м³, а клас небезпеки –1, тому її можна зварювати тільки в закритих камерах із витяжною вентиляцією зі швидкістю руху повітря в робочому отворі камери не менше 1 м/с, а вихідні отвори вакуумних насосів необхідно приєднувати до місцевої вентиляції. Після зварювання берилієвої бронзи камеру очищають 5 % розчином соляної кислоти із увімкненою місцевою витяжною вентиляцією і використанням респіратору «Лепесток».

Щоб знизити концентрацію ЗА в зоні дихання зварника місцеві пило- та газоприймачі необхідно розміщувати безпосередньо на робочому місці, а продуктивність стаціонарних або пересувних пристроїв вентиляції має бути не менша 1000 м³/год [2].

Як показав літературний огляд, дугове зварювання міді та її сплавів супроводжується значним виділенням зварювального аерозолі в робочу зону зварника. Дані щодо дослідження токсичності ЗА для дугових способів зварювання практично відсутні.

Порівняльна гігієнічна оцінка способів зварювання виконувалася за величиною повітрообміну вентиляції (м³/кг). Але ця величина не є об'єктивною і не дає нам повної картини про токсичність ЗА.

Згідно з міжнародними стандартами ДСТУ ISO 15011 зварювальні матеріали постійно повинні контролюватися за показниками безпеки праці (хімічний склад, рівень виділень, токсичність і гігієнічний клас зварювальних аерозолів). Тому для створення нових марок зварювальних матеріалів, які б задовольняли не тільки їх зварювально-технологічні, а й санітарно-гігієнічні характеристики, необхідно продовжити дослідження хімічного складу і рівнів виділень зварювальних аерозолів з використанням сучасних стандартизованих міжнародних методик ДСТУ ISO 10882-1:2008, ДСТУ ISO 10882-2:2008, ДСТУ ISO 15011-1:2008, ДСТУ ISO 15011-2:2008 та ДСТУ ISO 15011-4:2008.

Список літератури

- Осинцев О.Е., Федоров В.Н. (2004) *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник*. Москва, Машиностроение.
- Биковський О.Г. (2011) *Зварювання та різання кольорових металів. Довідковий посібник*. Київ, Основа.
- Закс И.А. (1999) *Электроды для дуговой сварки цветных металлов и сплавов*. Стройиздат, Санкт-Петербург.
- Levchenko, O.G., Lukianenko, A.O., Demetska, O.V., Arlamov, O.Y. (2018) Influence of Composition of Binder of Electrodes Coating on Cytotoxicity of Welding Aerosols. *Materials Science Forum*, 927, 86–92.
- (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.
- (1979) ГОСТ 859-2014. *Медь. Марки*. [Действующий от 1979-01-01] Группа В51. Москва, Межгосударственный стандарт.
- (2020) *Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони. № 1596 від 14.07.2020 р.* МОЗ України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#Text>.
- Пономаренко О.И., Шинский И.О., Моргун Н.Н. (2004) Литье по газифицируемым моделям бронзовых сплавов. *Литейное производство*, 11, 30.
- Пономаренко О.И., Лысенко Т.В., Становский А.Л., Шинский О.И. (2012) *Управление литейными системами и процессами*. Харьков, НТУ «ХПИ».
- Майданчук Т.Б., Скорина Н.В. (2014) Улучшение технологичности изготовления и сварочных свойств электродов для сварки и наплавки оловянных бронз. *Автоматическая сварка*, 6-7, 176–181.
- Илюшенко В.М., Аношин В.А., Скорина Н.В., Майданчук Т.Б. (2013) Выбор шлакообразующей основы покрытия электродов для дуговой сварки и наплавки литейных оловянных бронз. *Сварка и родственные технологии: Материалы VII науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов (22–24 мая 2013 г., г. Киев)*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, с. 155.
- Илюшенко В.М., Аношин В.А., Бондаренко А.Н. др. (2013) Разработка электродных материалов для сварки и наплавки сложнолегированных бронз. *Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: Сб. тез. стенод. докл. Междунар. конф. (25–26 ноябр. 2013 г.)*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, с. 72–73.
- Скорина Н.В., Кисилев М.О., Пальцевич А.П., Левченко О.Г. (2011) Свойства литийсодержащих жидких стекол для производства сварочных электродов. *Сб. докл. IV Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ. Краснодар*, с. 75–82.

References

- Osintsev, O.E., Fedorov, V.N. (2004) *Copper and copper alloys. National and foreign grades: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Bykovskiy, O.G. (2011) *Welding and cutting of nonferrous metals: Refer. book*. Kyiv, Osnova [in Ukrainian].
- Zaks, I.A. (1999) *Electrodes for arc welding of nonferrous metals and alloys*. Saint-Petersburg, Strojizdat [in Russian].
- Levchenko, O.G., Lukianenko, A.O., Demetska, O.V., Arlamov, O.Y. (2018) Influence of composition of binder of electrodes coating on cytotoxicity of welding aerosols. *Mat. Sci. Forum*, 927, 86–92.
- (2011) DSTU ISO 15011-4:2008. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling aerosols and gases. Pt 4: Form for recording data on aerosols*. Ed. by O.Bezushko, Yu. Bondarenko et al. Valid from 2008.08.15. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
- (1979) GOST 859-2014: *Copper. Grades*. Valid from 1979.01.01. Group V51. Moscow, Interstate standard [in Russian].
- (2020) *Hygiene chemicals regulations in the air of the working zone. Law 1596 of 14.07.2020*, Ministry of Health of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#Text>.
- Ponomarenko, O.I., Shinsky, I.O., Morgun, N.N. (2004) Casting by consumable patterns of bronze alloys. *Litejnoe Proizvodstvo*, 11, 30 [in Russian].
- Ponomarenko, O.I., Lysenko, T.V., Stanovsky, A.L., Shinsky, O.I. (2012) *Control of casting systems and processes*. Kharkov, NTU KhPI [in Russian].
- Majdanchuk, T.B., Skorina, N.V. (2014) Improvement of adaptability to fabrication and welding properties of electrodes for tin bronze welding and surfacing. *The Paton Welding J.*, 6-7, 176–181.
- Ilyushenko, V.M., Anoshin, V.A., Skorina, N.V., Majdanchuk, T.B. (2013) Selection of slag-forming base of electrode coating for arc welding and surfacing of cast tin bronzes. *In: Proc. of 7th Sci.-Techn. Conf. of Young Scientists and Specialists on Welding and Related Technologies (22-24 May 2013, Kiev, Ukraine)*. Kiev, PWI, 155.
- Ilyushenko, V.M., Anoshin, V.A., Bondarenko, A.N. et al. (2013) Development of electrode materials for welding and surfacing of complexly-alloyed bronzes. *In: Proc. of Abstracts of Int. Conf. on Welding and Related Technologies – Present and Future (25-26 November 2013, Kiev, Ukraine)*. Kiev, PWI, 72–73.
- Skorina, N.V., Kisilev, M.O., Paltsevich, A.P., Levchenko, O.G. (2011) Properties of lithium-containing liquid glasses for production of welding electrodes. *In: Proc. of 4th Int. Conf. on Welding Consumables of CIS countries*. Krasnodar, pp. 75-82.

HYGIENIC CHARACTERISTICS OF AIR IN THE WORKING ZONE DURING ARC WELDING OF COPPER AND ITS ALLOYS (Review)

O.G. Levchenko, O.M. Bezushko, T.B. Maidanchuk, A.O. Lukyanenko, O.M. Goncharova

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

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

E-mail: mail@kpi.ua

A literature review of harmful substances formed during arc welding of copper and its alloys is presented. Literature data on studying emissions of welding aerosols in welding of copper and copper alloys are considered. It is shown that to create new grades of welding materials that would satisfy not only their welding technology, but also sanitary and hygienic characteristics, it is necessary to continue the study of chemical composition and levels of emissions of welding aerosols using modern standardized international procedures. 13 Ref., 1 Tabl.

Key words: copper, welding, brass, bronze, welding aerosol, harmful substances, toxicity

Надійшла до редакції 3.12.2020

МЕТОД АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ОЦІНЮВАННІ СТАНУ ЗВАРНИХ ШВІВ ТА ЇХ СЛУЖБОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ. ЧАСТИНА 1. ВПЛИВ ТИПУ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ НА АКУСТИЧНУ ЕМІСІЮ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: inpat59@ukr.net

Більшість існуючих конструкцій містить зварні з'єднання. Представляють значний інтерес відмінності акустичної емісії для різних типів зварних з'єднань та зміна властивостей матеріалів діючих конструкцій, що мають зварні елементи, після тривалої експлуатації з урахуванням часу і ймовірного порушення експлуатаційних умов. Дані випробувань зразків з таких матеріалів показують високу чутливість методу акустичної емісії до типу зварного з'єднання і до змін службових характеристик зварних швів. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 14.

Ключові слова: зварні шви, службові властивості, акустична емісія (АЕ), АЕ активність, пошкодження, руйнування матеріалів, навантаження, прогноз

Службові властивості матеріалу являють собою характеристики, які виявляються при роботі матеріалу безпосередньо в реальних конструкціях. Вони є значно більш різноманітними, ніж ті, які визначаються для матеріалу при стандартних лабораторних випробуваннях зразків.

Відзначимо, що зварні з'єднання завжди є джерелом виникнення та розвитку дефектів завдяки внесенню значної частини дефектів у матеріал безпосередньо в процесі зварювання, а також виникнення залишкових напружень.

У Частині 1 розглядаються особливості та відмінності параметрів АЕ для зварних з'єднань різних типів.

Незалежно від виду дефектів в області зварного з'єднання і причин їх виникнення, будь-то пори (рис. 1), тріщини, непровари або інший фактор, вони є потенційними джерелами руйнування матеріалу. В зв'язку з цим область зварного з'єднання потребує першочергового контролю при проведенні технічної діагностики. Визначення реального залишкового ресурсу матеріалу і його несучої здатності також має базуватися на оцінці ресурсу і несучої здатності зварного з'єднання. Зіставлення властивостей основного металу і властивостей металу зварного з'єднання дозволяє більш достовірно оцінити стан контрольованого виробу, ніж контроль стану тільки основного металу. В даній роботі розглянуті саме ці важливі питання у такій послідовності:

1. Визначення відмінності АЕ при випробуваннях на розрив зразків зі зварними з'єднаннями різних типів та вибір найбільш інформативного

параметра, що характеризує накопичення пошкоджень під час деформування.

2. Визначення відмінності АЕ для зразків з металу зі зварними з'єднаннями від АЕ для металу, що їх не містить. Визначення параметра, що дозволить визначити, чи має зварні з'єднання зразок, що випробовується.

3. Перевірка дієздатності алгоритмів прогнозування руйнування, закладених у програмне забезпечення систем типу ЕМА, на зразках з різними типами зварних з'єднань.

Відзначимо, що дана стаття узагальнює результати випробувань, виконаних у різні роки з використанням систем ЕМА від 1-го до 3-го покоління, які мають такі відмінності у поданні амплітудних та шумових характеристик АЕ сигналів, як використання відповідно лінійного та логарифмічного режимів підсилювання. Незважаючи на це, завдання, поставлені у статті, виконані, зокрема, завдяки тому,

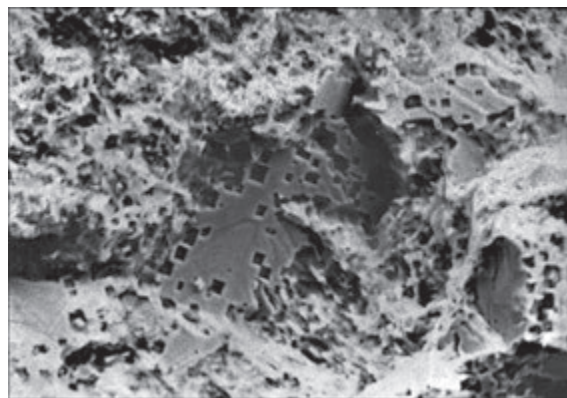


Рис. 1. Пори у зварному шві, які виникли за рахунок неякісного зварювання

Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Бойчук О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко, 2021

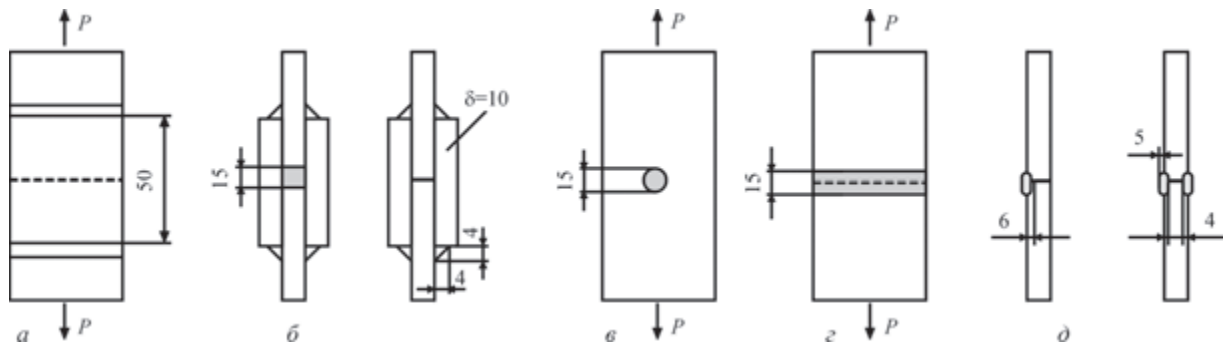


Рис. 2. Схеми випробуваних зварних з'єднань (опис а-д див. у тексті)

що, як показали проведені дослідження, абсолютні величини амплітуд сигналів АЕ не є принциповими для оцінки стану матеріалів та прогнозування їх руйнування. Дещо важливішим, хоча теж не вирішальним, є характер їх відносної зміни у процесі деформування та накопичення пошкоджень.

Для вирішення поставлених завдань було проведено ряд випробувань зразків зі сталі 17ГС з метою виявити відмінності в параметрах АЕ, що виникає при руйнуванні матеріалу з різними зварними з'єднаннями. Виготовлено серії зразків з поперечним розрізом та декількома видами зварних з'єднань (рис. 2):

- а – з поперечним швом і привареними до поверхні зразка двосторонніми накладками;
- б – з привареними до поверхні зразка двосторонніми накладками;
- в – з точковим зварним з'єднанням;
- г – з одностороннім поперечним зварним швом;
- д – з двостороннім поперечним зварним швом.

Зварні з'єднання виконані ручним дуговим електричним зварюванням, тип електроду УОНИ-13, діаметр 3 мм.

Для дослідження стану матеріалів труб використовували стандартні зразки першого типу [1] для АЕ випробувань (рис. 3). Для руйнування зразків використовували розривну машину з гідравлічним приводом Р-20.

При випробуваннях використовували АЕ систему ЕМА-2 з розташуванням антени з чотирьох



Рис. 3. Зразок для проведення випробувань з застосуванням АЕ технології

датчиків на зразку за лінійною схемою (рис. 3). Обробку даних виконували з використанням сучасної програми ЕМА-3.92. Відстань між центрами датчиків становила 110 мм, контрольована зона – 140 мм (по 70 мм вліво і вправо від центру зразка). Дані обробляли з використанням кластерного аналізу в процесі випробувань і при післяекспериментальній обробці. Події АЕ, що пройшли відбраковування за координатною ознакою, об'єднували у кластери. Радіус кластеру становив 20 мм, що дозволило відстежувати центри локалізації АЕ по довжині зразка в межах контрольованої зони. Реєстрували сигнали АЕ у діапазоні 100...1000 кГц.

Найбільш типові результати випробувань представлені у вигляді графіків на рис. 4–8. На них лініями синього кольору побудовано стовпчастий графік амплітуд подій АЕ (A , мВ),

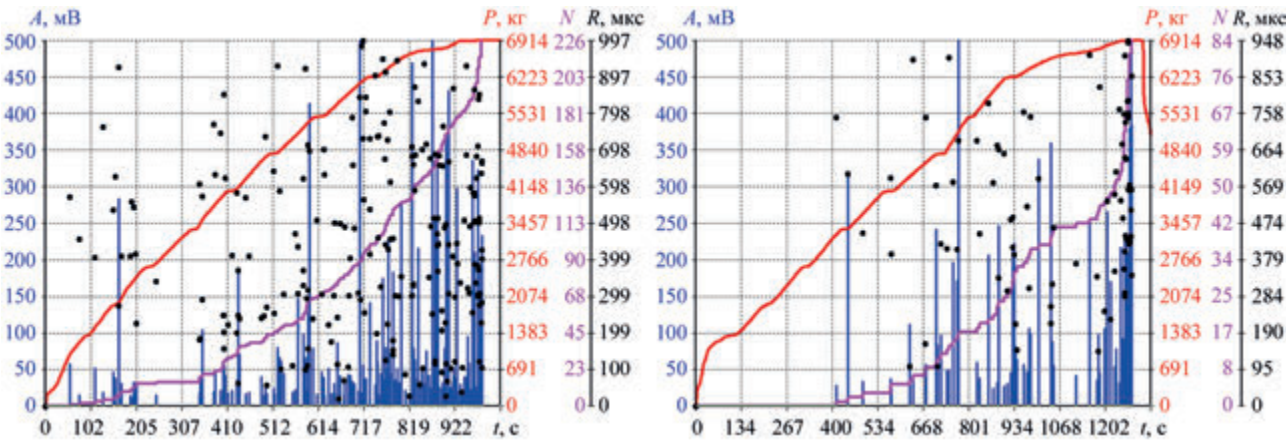
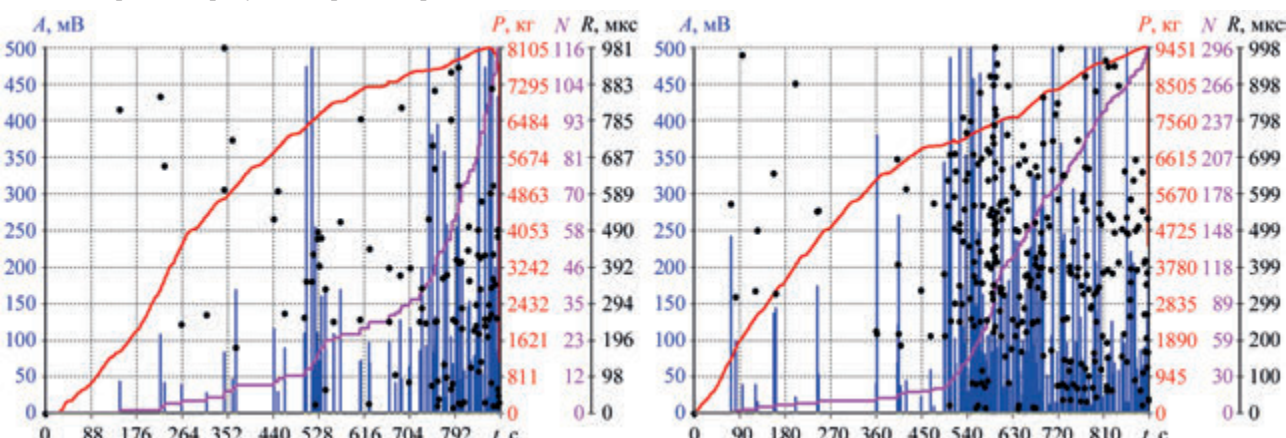
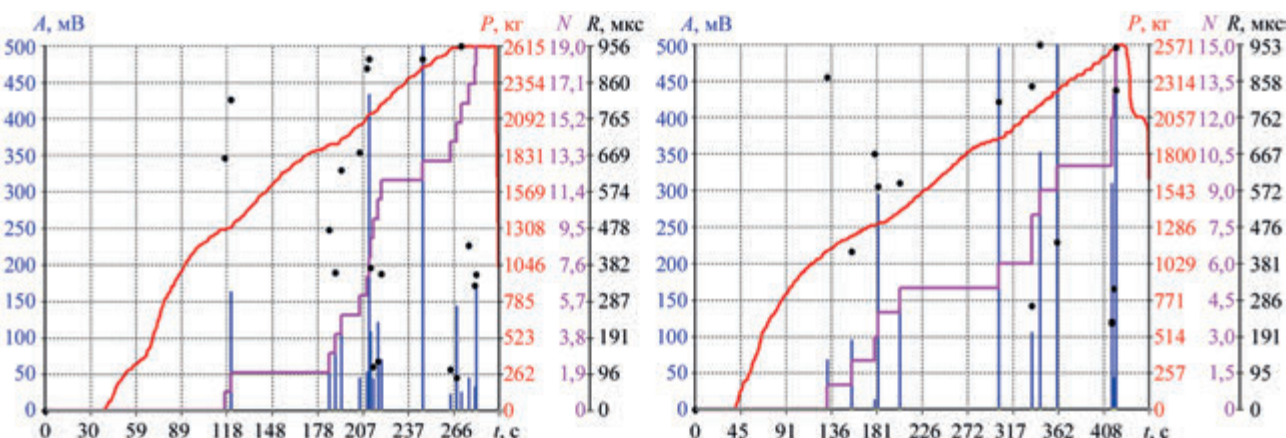
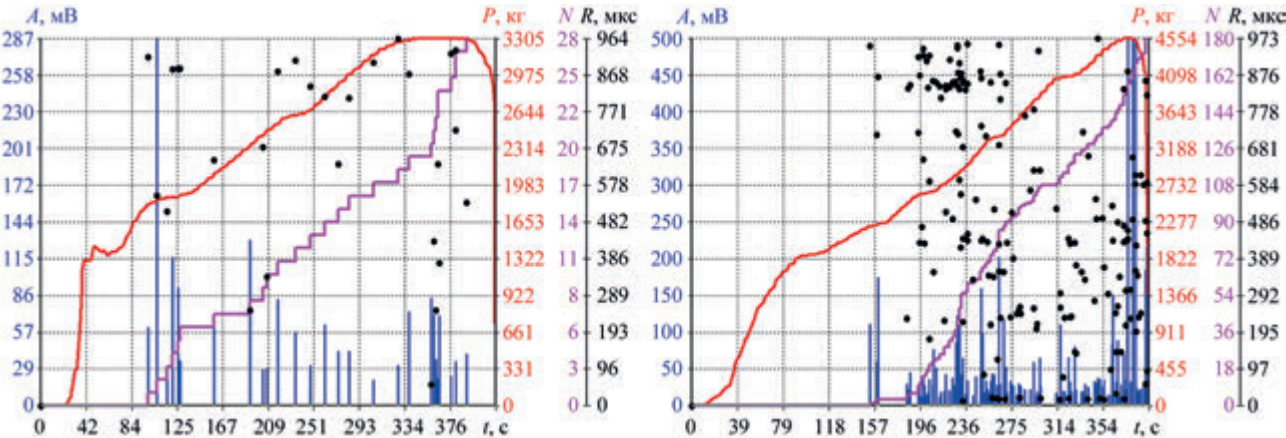
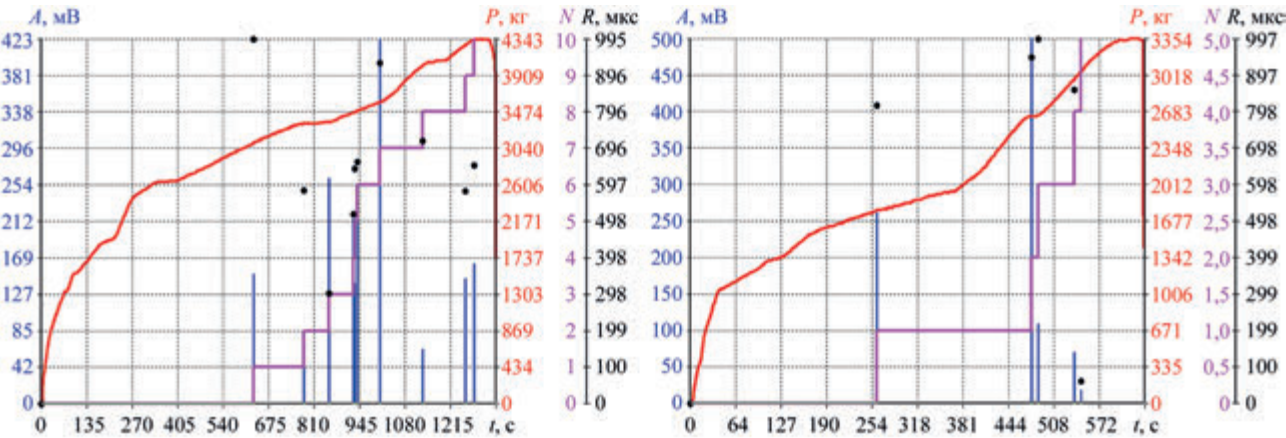


Рис. 4. Діаграми випробування зразків серії а



червоного – лінійний графік навантаження на зразок (P , кг), чорного – точковий графік параметру «Райс тайм» (R , мкс), який характеризує час наростання сигналу до максимуму, фіолетового – лінійний графік сумарного числа подій АЕ (N , безрозмірний). По осі абсцис відкладено час від початку випробування.

Випробування показали, що найбільше руйнівне навантаження 70...95 кН (7000...9500 кг) характерне для зразків серії δ . Найменше, приблизно 26 кН (≈ 2600 кг), – для серії z . Це є цілком закономірним, оскільки площа перерізу матеріалу в робочій частині при такому зварному з’єднанні менше, ніж для інших зразків. Крім того, в процесі навантаження зразків реалізуються одночасно позакцентроване розтягнення і вигин. Кількість сигналів АЕ для даної серії зразків невелика, що може бути пояснено такими факторами:

- меншим числом пошкоджень, внесених зварюванням;
- виникненням більшості подій АЕ вже в процесі утворення тріщини, про що свідчить поява АЕ при навантаженнях, близьких до руйнуючих, і високі, близько 500 мВ, амплітуди, що є максимальними для АЕ приладів типу ЕМА-2.

Характерною є відсутність однакової акустичної картини для зразків у рамках кожної з серій, за винятком зразків зі зварною точкою серії ϵ і зразків з двостороннім швом серії δ .

Найбільш відрізняються зразки в рамках серії δ . Руйнування їх спочатку відбувалося по одному шву, потім по другому. Випробування зупиняли після руйнування одного з швів. Число подій для даних зразків відрізняється в 4,5 рази, максимальні амплітуди – в 2 рази.

Для зразків зі зварною точкою (серія ϵ) і зразків з двостороннім поперечним швом (серія δ) акустична емісія спостерігалася в області радіусів заокруглення на потовщенні робочої частини. Очевидно, що для таких видів зварних з’єднань концентрація напружень в області шва була найменшою, в результаті чого зразок деформувався

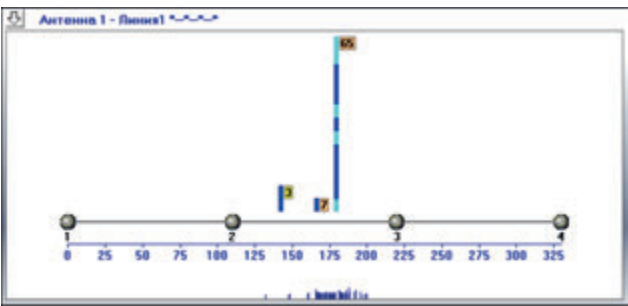


Рис. 9. Екран програми ЕМА-3.92 з типовими результатами локації подій АЕ при випробуванні зварного зразка. Стовпчиками з прапорцями показані сформовані на основі подій АЕ кластери, колір смужок на стовпчиках відповідає певному діапазону амплітуд. Самі події АЕ (координати по горизонталі та амплітуди по вертикалі) відображені вертикальними лініями унизу локаційної схеми

більш рівномірно. Це призвело до виникнення зон пластичної деформації і початку процесу накопичення пошкоджень в області радіусів заокруглення, і, зрештою, послужило причиною виникнення сигналів АЕ.

Характерним є формування руйнування в навколошовній зоні. Як правило, для всіх зразків спостерігалось декілька центрів випромінювання АЕ у зоні зварного з’єднання, один з яких збігався з місцем розташування зварного шва або точки, інші перебували на відстані 5...25 мм від центру шва в зоні термічного впливу (рис. 9).

Акустичні сигнали, що приходять із зони радіусів заокруглення, істотно відрізняються від сигналів, що приходять від зварного з’єднання. Вони менші за амплітудою і пов’язані в першу чергу з пластичною деформацією зразка, у зв’язку з чим розподілені в часі більш рівномірно. Сигнали АЕ з області зварного з’єднання викликані переважно дефектами, що виникають при зварюванні. Їх амплітуда вища, а характер появи більш випадковий. Тому і амплітуда, і активність АЕ чітко дозволяють відрізнити акустичну емісію з області зварного з’єднання від акустичної емісії з області пластичних деформацій.

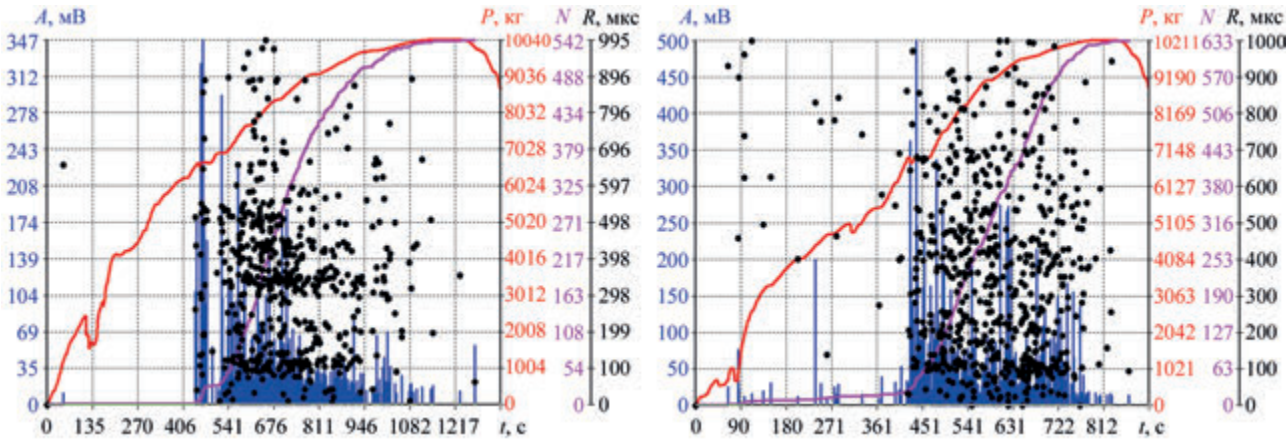


Рис. 10. Діаграми випробування зразків суцільного металу зі сталі 17ГС

В цілому видно, що найбільш повно відображає характер накопичення сигналів АЕ в матеріалі зварного з'єднання в процесі деформування зразків такий параметр, як сумарне число подій АЕ (на графіках позначене як N).

Зокрема, слід звернути увагу на зміну кута нахилу графіка вищевказаного параметра для зразків зі зварними з'єднаннями, що добре помітно на графіках і може бути пов'язано з початком формування зони руйнування. Якщо порівняти форму кривої N суми подій АЕ для зварних з'єднань та для суцільного металу цієї ж марки (рис. 10), одразу стає очевидною відмінність: для матеріалу зі зварними з'єднаннями на ділянці регулярної АЕ активності, тобто коли події АЕ не є одиничними і виникають досить рівномірно у часі, крива N є увігнутою, а для суцільного матеріалу, навпаки, випуклою.

Таким чином, кут нахилу на переломі кривої накопичення подій АЕ є критеріальним. Він дозволяє відрізнити матеріал з наявністю зварного з'єднання від матеріалу без такого. Це підтверджується численними наявними випробуваннями різних матеріалів.

Зокрема, проведені дослідження зварних зразків, підготовлених за такою методикою: вже випробувані на розрив зразки (без зварного з'єднання) були зварені за місцем розриву. Якість

зварного з'єднання спеціально робили довільною, оскільки зразки надалі використовували для перевірки прогнозу руйнівного навантаження, щоб воно не було заздалегідь відомим. Було підготовлено 20 зразків зі з'єднаннями двох типів – двостороннім швом і зварною точкою. Далі зразки випробували за тією ж методикою, що й інші. Випробування зразків даного типу цікаві тим, що АЕ можна однозначно ідентифікувати як пов'язану з руйнуванням зварного з'єднання, оскільки, з урахуванням ефекту Кайзера, основний метал повинен в процесі деформування випромінювати мінімальну кількість подій АЕ. Відмінність від попередньої серії випробувань полягає в тому, що вимірювання параметрів АЕ виконані системою ЕМА-3 і амплітуда АЕ виражена у децибелах відповідно до використання логарифмічного режиму підсилювання сигналу на відміну від системи ЕМА-2.

На діаграмах, представлених на рис. 11, 12, відображені параметри, аналогічні показаним на рис. 4–8, відповідно і позначення ті ж самі.

Число пошкоджень з часом зростає (на графіках – крива N), але у зразках без зварного з'єднання в якийсь момент часу зростання сповільнюється [2–6]. Різниця при випробуваннях зварних зразків полягає у тому, що для них на завершальній ділянці навантаження не спостерігається

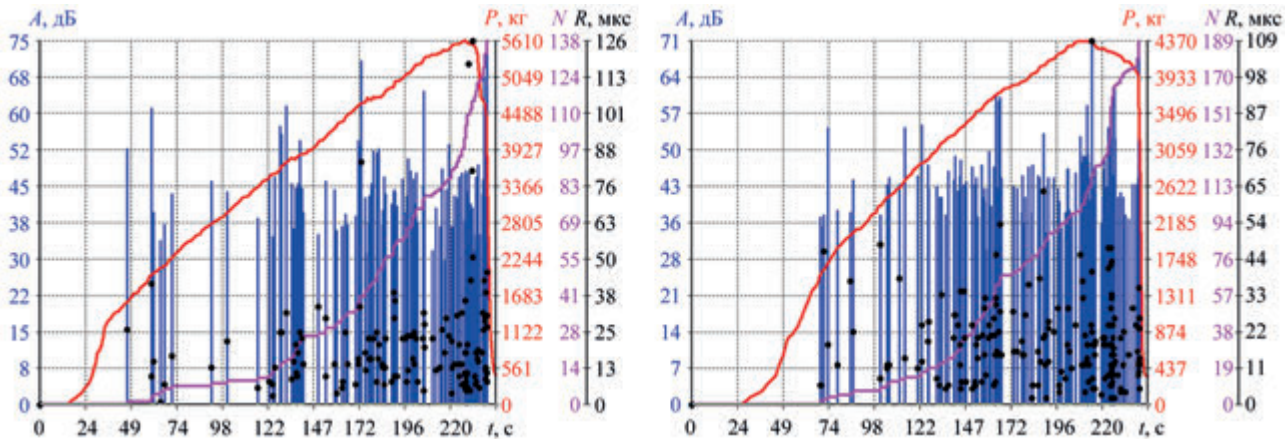


Рис. 11. Діаграми випробування зразків з двостороннім обварюванням

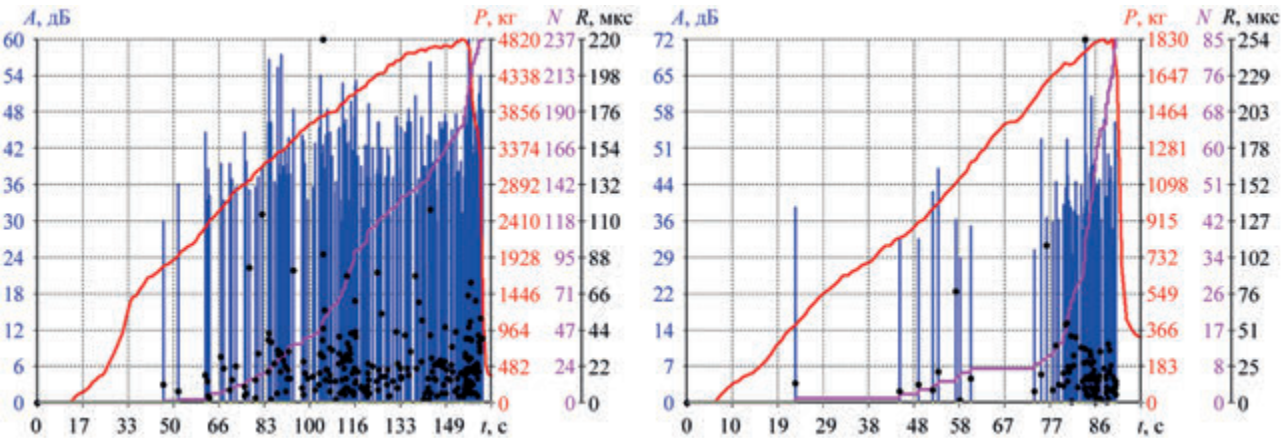


Рис. 12. Діаграми випробування зразків з довільно виконаним зварним швом

зменшення АЕ активності, завдяки чому, власне, і виникає відмінність форми кривої *N*. В той же час суттєвий розкид такого параметру як «Райс тайм» дозволяє стверджувати, що для випробування зразків він не може виступати у якості критеріального. Амплітуда ж подій АЕ корелює з процесами накопичення пошкоджень руйнування не завжди, тому теж не може бути використана як універсальний критерій.

Наведені вище дані стосуються сталевих зразків. Свого часу, ще з використанням АЕ систем ЕМА-1 на базі приладів «Defectophone», подібні дослідження виконували для алюмінієвих сплавів АМцС та АМцН (основні властивості цих двох матеріалів є дуже близькими). Випробували малогабаритні зразки з різними типами концентраторів (рис. 13, а) і широкі плоскі зразки АР-02 (рис. 13, б) особливої рамної конструкції, призначеної для рівноважного деформування [7, 8] центральної їх частини (це дозволяє отримати під час випробувань повну діаграму деформування з падаючою до нуля гілкою навантаження), з двома типами зварних з'єднань – двостороннім зварним швом та зварною точкою (автоматичне дугове зварювання електродом АМц 1,8 мм, струм 360 А, напруга 380 В). Малогабаритні зразки без зварного з'єднання показали вкрай низьку акустичну активність – 1 або 2 події АЕ за весь час випробувань, і ці події виникали безпосередньо під

Таблиця 1. Підсумкові результати випробувань алюмінієвих сплавів АМцС та АМцН

Тип зразка	Малогабаритний	АР-02		
		Без зварювання	Зі зварною точкою	З двостороннім зварним швом
Кількість подій АЕ	2	28	398	438

час руйнування зразка. Навіть наявність концентратора напружень не впливала на низьку АЕ активність. Широкі зразки при відсутності зварного з'єднання показали дещо вищу АЕ активність, ніж малогабаритні, але все одно суттєво нижчу, ніж у більшості випробуваних сталей.

Проте, наявність зварного з'єднання призводила до суттєвого збільшення кількості подій АЕ, яке однозначно можна пов'язати з об'ємом матеріалу, що входить до зони термічного впливу. В табл. 1 коротко надані підсумки випробувань алюмінієвих зразків з максимальною кількістю зареєстрованих подій АЕ.

Результати усіх наведених випробувань показують, що зварне з'єднання є основним джерелом АЕ, що реєструється в процесі навантаження, а число подій залежить від об'єму матеріалу, що входить в зону термічного впливу. Ще однією особливістю є відсутність АЕ до моменту, коли процес руйнування зразків починає концентруватися в зоні зварного з'єднання.

Під час випробувань виконано перевірку прогнозу руйнівного навантаження зварних зразків програмним забезпеченням ЕМА-3.92. Типовий фрагмент вікна програми з індикатором небезпеки, на якому відображені результати прогнозу, наведено на рис. 14. Пояснення щодо екрану локаційної антени дані в описі до рис. 9. Зверху над екраном локації показані елементи керування випробуваннями, таймер, а нижче стрічка-індикатор з прогнозом руйнівного навантаження.

На індикаторі небезпеки вказано номер локаційної АЕ антени (у даному випадку № 1), номер

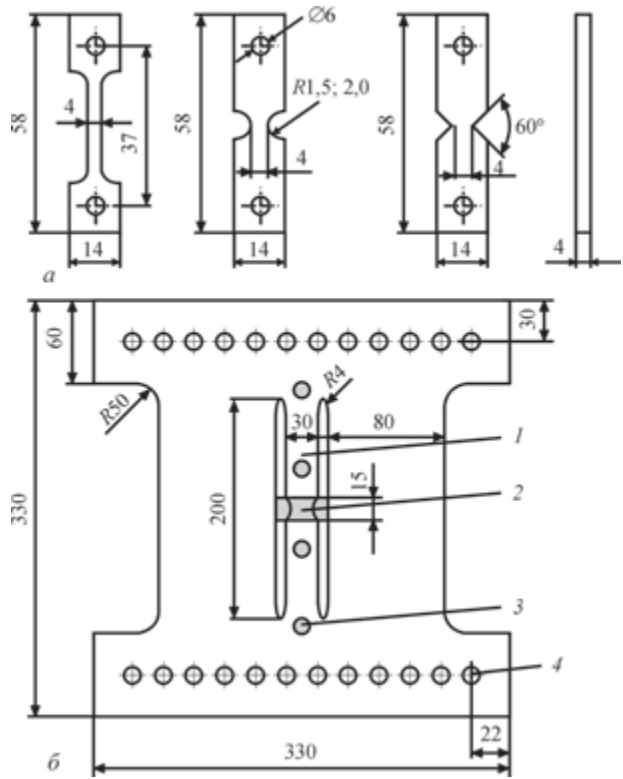


Рис. 13. Зразки для випробувань алюмінієвих сплавів: а – зразки з різними типами концентраторів; б – широкі плоскі зразки (1 – пружний динамометр; 2 – область зварного з'єднання; 3 – датчик АЕ; 4 – 12 отворів Ø 12 мм з відстанню 26 мм)

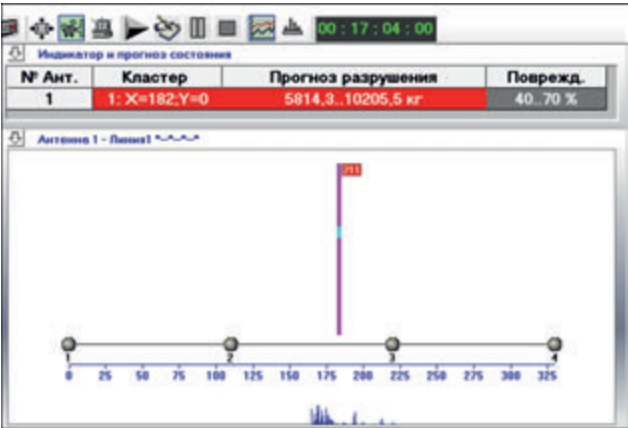


Рис. 14. Екран програми ЕМА-3.92 з результатами локації подій АЕ та прогнозуванням руйнівного навантаження при випробуванні одного із зразків

Таблиця 2. Результати прогнозу руйнівного навантаження сталевих зразків

Тип та номер зразка	Час прогнозу руйнування, с	Час початку руйнування, с	Кількість подій АЕ, за якими виконаний прогноз	Поточне навантаження, при якому надано прогноз, кг	Рівень попередження про небезпеку	Прогноз руйнування – нижня межа, кг	Прогноз руйнування – верхня межа, кг	Дійсне руйнівне навантаження, кг
Без зварного з’єднання № 1	352	1153	27	5907	1	8787	15424	10039
Без зварного з’єднання № 2	249	836	12	4738	1	6857	12036	10211
Серія а № 1	402	991	11	4065	1	5814	10205	6914
Серія б № 1	1005	1297	7	3702	1	4812	9207	4342
Серія в № 1	248	392	13	2734	2	3731	4305	3305
Серія г № 1	189	290	4	1956	1	2866	5031	2615
Серія д № 1	230	855	3	2936	1	4733	8307	8105
Двостороннє обварювання № 1	71	228	7	2250	2	3217	5647	5610
Шов невідновленої якості № 1	68	155	8	2600	2	3718	6526	4820

кластеру подій АЕ, для якого виконувався прогноз (№ 1), та координати його центру (182 мм), які відраховуються від датчика з номером 1 зліва направо. Далі подано прогноз руйнування, вказаний у кг згідно зі шкалою розривної машини, і виражена у відсотках розрахункова пошкодженість матеріалу зразка на момент видачі максимального попередження № 3 – «Небезпека».

У табл. 2 наведені вибіркові результати прогнозу руйнівного навантаження для зразків без зварного з’єднання та зі з’єднаннями різних типів. Надати всі отримані дані не вважається можливим у зв’язку з великою їх кількістю. Необхідні закономірності досить наявно можна побачити, аналізуючи ті дані, які було включено до табл. 2.

Як можна побачити з табл. 2, для більшості зразків реальне руйнівне навантаження попадає в діапазон прогнозування. Виключення становлять зразки серій б, в і г, для яких прогноз перевищує справжнє значення руйнівного навантаження. І хоча нижня межа прогнозу вкладається в допустиме для систем типу ЕМА відхилення $\pm 15\%$, верхня межа суттєво його перевищує. Проаналізуємо, чому саме для зразків вказаних серій відбувається таке явище. Найбільш очевидний висновок – зразки цих серій під час випробувань підлягають позацентровому розтягу. В той же час алгоритми прогнозування, які закладалися у програмне забезпечення систем ЕМА, базувалися на еталонах, що передбачають традиційне рівномірне навантаження стрижневих зразків або трубооболонкових конструкцій [9]. Таким чином, для коригування прогнозу руйнування під випадки позацентрового розтягу слід провести додаткове дослідження, яке дозволило б досягти більш достовірних результатів прогнозу або завдяки встановленню

особливих коефіцієнтів для такого виду навантаження, або за рахунок додавання нових еталонів, на яких базується розпізнавання стану матеріалу.

В той же час слід відзначити, що виявлена похибка прогнозування не є критичною, по-перше, оскільки нижня межа прогнозного руйнівного навантаження входить у допустимий діапазон похибок, по-друге, оскільки попередження про небезпеку, яке відображується червоним кольором індикатора (див. рис. 13), генерується програмою ЕМА-3.92 заздалегідь, до досягнення межі міцності матеріалу.

Таким чином, навіть без внесення коректив у налаштування прогнозу, системи типу ЕМА можуть забезпечити своєчасне попередження про небезпеку руйнування зварних з’єднань.

Висновки

1. При наявності в зразку зварного з’єднання воно є основним джерелом АЕ. Кількість подій АЕ у зразках із зварним з’єднанням, як правило, перевищує таку в зразках суцільних.
2. Процес руйнування зварних зразків характеризується більш рівномірною в часі активністю АЕ для зразків з найбільшим об’ємом матеріалу зварного з’єднання і менш рівномірною для зразків з найменшим об’ємом матеріалу зварного з’єднання.
3. Найбільшим об’ємом матеріалу зварного з’єднання відповідають максимальна кількість і амплітуда подій АЕ, що видно при порівнянні результатів випробувань зразків серій а, в і д з серіями б і г.
4. Для зразків із зварними з’єднаннями характерна більша різноманітність отриманої картини

часового розподілу АЕ, амплітудних та інших характеристик, ніж для зразків без зварювання, що свідчить про вплив якості зварного з'єднання на кількість внесених ним в матеріал пошкоджень. Активність АЕ залежить від рівня пошкодженості матеріалу, викликаного зварюванням.

5. Прогноз руйнівного навантаження для більшості зразків дає задовільні показники. Для зразків серій б, в і г, що під час випробувань піддаються позакцентровому розтягу, прогноз руйнування дає дещо завищені показники руйнівного навантаження. Це слід враховувати при випробуваннях конструкцій, де наявний такий спосіб навантаження зварного з'єднання.

6. Параметром, який може служити характеристикою пошкодження металу зварного з'єднання, є сума подій АЕ. Кут перегину кривої суми подій АЕ дозволяє відрізнити випробування суцільного металу від металу із зварним з'єднанням. Наявність можливості оцінити об'єм задіяного під час зварювання металу може підвищити достовірність використання даної характеристики.

Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: учебное пособие*. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
2. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашова Л.И. и др. (2018) Исследование методом акустической эмиссии кинетики накопления повреждений при разрушении материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 3–10.
3. Недосека С.А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Там же*, 2, 3–9.
4. Скальський В.Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Там же*, 4, 29–36.
5. Stone, D.E., Dingwall, P.F. (1977). Acoustic Emission parameters and their interpretation. *NDT international*, 10, 51–56.

6. Tetelman, A.S., Chow, R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour. 7-8 December, 1971*, pp. 30–40.
7. Волков В.А. (1980) Основные результаты всесоюзного базового эксперимента по механике разрушения на низкопрочной стали. *Проблемы разрушения металлов*. Москва, МДНТН, сс. 3–22.
8. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. (1988) *Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов*. Киев, АН УССР, препринт.
9. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение*. Киев, Изд-во «Индпром».

References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton. 5th Ed. Kiev, Indprom [in Russian].
2. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I. et al. (2018) Investigation by acoustic emission method of the kinetics of damage accumulation at fracture of materials. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 3-13 [in Ukrainian].
3. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Ibid.*, 2, 3-9 [in Russian].
4. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solids, based on acoustic emission signals. *Ibid.*, 4, 29-36 [in Russian].
5. Stone, D.E., Dingwall, P.F. (1977). Acoustic emission parameters and their interpretation. *NDT Int.*, 10, 51-56.
6. Tetelman, A.S., Chow, R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. In: *Proc. of Symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials (Bal Harbour. 7-8 December, 1971)* 30-40.
7. Volkov, V.A. (1980) *Basic results of All-Union experiment on fracture mechanics of low-strength steel*. In: *Problems of metal fracture*. Moscow, MDNTN, 3-22 [in Russian].
8. Lebedev, A.A., Chausov, N.G. (1988) *Express-method of evaluation of crack resistance of plastic materials*. Kiev, AS of Ukr.SSR [in Russian].
9. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) *Acoustic emission and service life of structures: Theory, methods, technologies, facilities, application*. Kiev, Indprom [in Russian].

ACOUSTIC EMISSION METHOD AT EVALUATION OF THE STATE OF WELDS AND THEIR SERVICE PROPERTIES.

Part 1. EFFECT OF WELDED JOINT TYPE ON ACOUSTIC EMISSION

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, O.I. Boichuk, M.A. Ovsienko

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

E-mail: inpat59@ukr.net

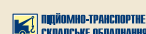
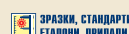
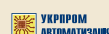
The majority of existing structures have welded joints. It is of considerable interest to determine the differences in acoustic emission for various types of welded joints and change of the properties of materials in operating structures, which have welded elements after long-term service, taking into account the time and probable violation of service conditions. The data of testing samples from such materials demonstrate the high sensitivity of acoustic emission method to welded joint type, and to changes of weld service properties. 9 Ref., 2 Tabl., 14 Fig.

Keywords: welds, service properties, acoustic emission (AE), AE activity, material destruction, loading, prediction

Надійшла до редакції 22.12.2020

**XX МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2021**
МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

**16 - 19
листопада**



КОНФЕРЕНЦІЇ, ВИСТАВКИ, СЕМІНАРИ – 2021

Назва заходу	Дата	Місце проведення
VI International Electron Beam Welding Conference	9–10 березня	(online)
XXI Міжнародний науково-технічний семінар «Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті»	15–19 березня	Львів, Україна
Kharkiv PROM Days	24–26 березня	Арт-завод «Механіка», Харків
XX Міжнародна спеціалізована виставка «Зварювання та різання – 2021»	6–9 квітня	Мінськ, Білорусь
XVIII Міжнародна спеціалізована виставка «Порошкова металургія–2021»	6–9 квітня	Мінськ, Білорусь
Київська технічна ярмарка	13–15 квітня	Київ, Україна
Міжнародна конференція «Sudura 2021/Welding 2021»	22–23 квітня	Решіця, Румунія
XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні–2021»	28–29 квітня	КПІ, Київ
XXVIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2021»	13–15 травня	Харків
ElcomUkraine – виставка енергетики, електротехніки, енергоефективності	18–20 травня	Київська обл.
XXIV Міжнародна спеціалізована виставка «Машинобудування. металургія»	21–23 травня	Запоріжжя, Україна
VII Міжнародна Самсонівська конференція «Матеріалознавство Тугоплавких Сполук»	25–28 травня	Київ, Україна
Міжнародна конференція молодих професіоналів із зварювання та суміжних технологій	25–28 травня	Київ, Україна
Міжнародна конференція «Сучасні технології з'єднання матеріалів»	31 травня – 2 червня	ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ
XXV Міжнародна Пекінська Виставка зварювання та різання	16–19 червня	Пекін, Китай
74-ий конгрес Міжнародного Інституту зварювання та міжнародна конференція	7–21 липня	(online)
XXIII Міжнародна конференція «Матеріали, Методи, Технології»	19–22 серпня	Бургас, Болгарія
II Міжнародна конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану»	6–11 вересня	Одеса, Україна
X Міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів»	6–11 вересня	Одеса, Україна
Міжнародна ярмарка «Welding Engineering – Joining, Cutting, Surfacing»	13–17 вересня	Ессен, Німеччина
XX Міжнародна виставка зварювальних матеріалів, устаткування і технологій – Weldex	12–15 жовтня	Москва, РФ
Міжнародна виставка зварювального устаткування і технологій	19–21 жовтня	Кельце, Польща
Міжнародна виставка зварювання, зварювального обладнання та технологій	27–28 жовтня	Гданьськ, Польща
Міжнародна виставка промислових технологій	27–28 жовтня	Гданьськ, Польща
XX Промисловий форум	16–19 листопада	Київ, Україна

ЗВАРЮВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Основну частину зварювальних матеріалів в автомобільній промисловості складають суцільні зварювальні дроти різних марок в залежності від типу основного металу.

Ці дроти періодично вдосконалюються з метою покращення їх зварювальних характеристик.

Деякі дослідження спрямовані на оптимізацію хімічного складу дротів з метою їх найефективнішого поєднання з основним зварюваним металом. В даний час автомобільна промисловість використовує для виробництва кузовів широкий спектр різних матеріалів.

Існують важливі вимоги до електродів, що включають надійність подачі, низький рівень розбризкування, низький рівень або відсутність забруднення поверхні зварних з'єднань і легкість зварювання листів з цинковмісним або алюмінізованим покриттям. В автомобілебудуванні знаходять застосування також порошкові дроти.

При проектуванні елементів системи видалення відпрацьованих газів і каталитичних пристроїв особлива увага приділяється вибору матеріалів, які забезпечують ефективність роботи та довговічність елементів системи, на які впливають високі температури. Такі ж вимоги висувуються і до зварювальних матеріалів. Вони повинні мати високу температурну стійкість, забезпечувати корозійну стійкість і мати достатні характеристики втомної міцності. Саме з цією метою і з'явилися порошкові дроти, які можуть задовольнити перераховані вище вимоги.

Зміна виду зварювання. Описаний нижче приклад показує, як зміна зварювального матеріалу і процесу покращили якість, а в даному випадку і продуктивність процесу. Цей приклад відноситься до каталитичного пристрою і, зокрема, до з'єднання фланця з вихідною трубою.

Вихідна труба пристрою виготовлена з феритної корозійностійкої сталі; фланець – зі звичайної вуглецевої сталі. Зазвичай для зварювання вико-

ристовували суцільний зварювальний дріт діаметром 1,0 мм, стабілізований ніобієм класу 409.

При зварюванні виникали проблеми розбризкування і поганого переносу металу електрода на основний метал, що викликало знижену витривалість і дуже високу твердість металу в ЗТВ. В цьому випадку до зварювального дроту висуваються жорсткі вимоги для отримання якісного зварного з'єднання. При розробці технології, що покращує якість зварювання цього з'єднання, було також випробувано порошковий дріт класу E 409.

В результаті розбризкування різко зменшилось і спостерігається рівномірний перенос металу електрода до основному металу, що суттєво збільшило втомну міцність з'єднання. Як і раніше, залишались проблеми високої твердості шва в області ЗТВ: твердість була підвищеною і важко контролювалась вибором зварювальних параметрів.

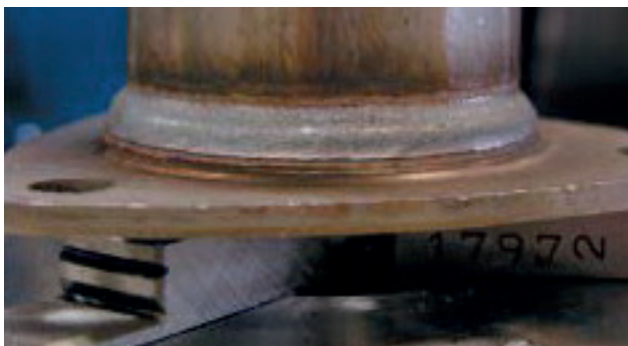
Для зменшення твердості і забезпечення необхідної жаростійкості і корозійної стійкості було випробувано порошковий дріт іншої марки – E 307 (18/18/6) діаметром 1,2 мм. Твердість зменшилась; вона не перевищувала HV 10-225, і мікроструктура перехідної ділянки між феритною корозійностійкою сталлю і вуглецевою сталлю стала сприятливою. Крім рішення вище зазначених проблем застосування цього порошкового дроту дозволило збільшити швидкість зварювання з 12 до 20 мм/с, що підвищило продуктивність і на 22 % знизило вартість виготовлення кожної деталі.

Обширні знання і ноу-хау в області зварювальних процесів, а також тісна співпраця ЕСАБ з замовниками з автомобільної промисловості призвели в результаті до появи нових технологій зварювання тонколистових виробів.

Далеко не всі виробники перейняли інший підхід до зварювання тонколистових виробів – при зменшенні товщини листа замість зменшення діаметра суцільного дроту застосовувати порошковий дріт.

Нова технологія використовує для зварювання роботи і порошковий дріт діаметром 1,4 мм.

Марка порошкового дроту, що розроблена для роботизованого зварювання, – OK Tubrod 14.11. Вона має відмінні властивості подачі, необхідні для невпинної роботи зварювального робота. Дуга виключно стабільна і, отже, майже виключає розбризкування. Особливістю цього дроту є можливість зварювання при великих величинах зварювального струму і малої напруги дуги. Такі результати було досягнуто в результаті цілеспрямованих досліджень.



З'єднання труби з фланцем

На рисунку показано зварну тормозну педаль. При зварюванні замість суцільного дроту використовували порошковий дріт ОК Tubrod 14.11.

В результаті робочий цикл зварювання зменшився на 31 %. Більшість зварювальників знають, що вартість кілограму порошкового дроту приблизно в чотири рази більша за вартість кілограму суцільного дроту. Проте, дякуючи збільшенню продуктивності, вартість одного виробу знизилась на 11 %.

Застосування порошкового дроту в даному випадку не тільки значно знизило вартість виготовлення виробів, але й покращило якість зварювання і суттєво знизило рівень розбризкування.

Зниження циклу роботизованого зварювання тонколистових виробів дуже велике. Це особливо важливо для автомобільних заводів і їх постачальників, які прагнуть підвищити продуктивність і стабільність якості.

При впровадженні нових, більш ефективних зварювальних матеріалів дуже важливо, щоб вони використовувались у всьому виробничому ланцюгу. Інакше можуть з'явитись слабкі ділянки, які скорочують загальне підвищення продуктивності. Продумані зміни технології зварювання всього виробничого ланцюга суттєво заощаджують вкладені кошти. Нові технології зварювання повинні вводитись там, де вони найбільш ефективні.

При зварюванні виробів «труба + фланець» було не важко визначити заходи, які знижують вартість виготовлення виробів. Вартість зварювального робота і витрати на оператора складають 94 % від вартості роботизованої ділянки зварювання. Враховуючи цю цифру, можна засумніватися в доцільності багатогодинних перемовин з питання зниження вартості зварювальних мате-



Зварна тормозна педаль

ріалів на 5 %, якщо цей матеріал знижує вартість виробництва.

Ось чому застосування більш коштовного порошкового дроту ОК Tubrod 14.11 вигідно підприємствам – знижується вартість виробництва і збільшується продуктивність. Геометрія шва забезпечує плавний перехід наплавленого металу до основного металу. Профіль проплавлення ширший і більш стабільний, що знижує залежність якості шва від нерівномірності зазору стика. Значно знижується ризик появи зварювальних дефектів і браку. Це – очевидна економія.

Зниження розбризкування веде до зменшення зупинок, що пов'язані з чисткою приспосіб. Крім того, принаймі на 50 % знижується кількість зупинок робота для очищення газового сопла. Це ще один фактор, що впливає на тривалість зварювальних циклів.

Дуже важливо також обирати потрібний вид пакування дроту. Для суцільного дроту – це, безумовно, Marathon Pac. З'явилась також упаковка Jumbo Pac, що містить 475 кг дроту. Слід зазначити, що застосування упаковки Marathon Pac дозволяє змінювати упаковки, не зупиняючи процес зварювання.

За матеріалами сайту ТОВ «НІСА»

Витратні деталі для різання під дуже великими кутами від компанії Hypertherm

Компанія Hypertherm — виробник промислових систем різання і програмного забезпечення — повідомила про випуск витратних деталей для різання під дуже великими кутами для системи киснево-плазмового і повітряно-плазмового різання MAXPRO200®LongLife®. Витратні деталі призначені для механізованого, роботизованого і ручного різання. Сопло і захисний екран мають яскраво виражену загострену конусоподібну форму; таке виконання забезпечує можливість нахилу плазмового різача при виконанні різання під кутом до 66,5 градусів.

Завдяки цьому витратні деталі ідеально підходять для виконання широкого спектру робіт, в тому числі механізованого різання зі скосом під великим кутом, різання труб, в тому числі тонкостінних, виготовлення металоконструкцій, складання і монтажу посудин високого тиску і ручного різання. Крім того, таке виконання витратних деталей дозволяє операторам краще бачити робочу зону різання і надає можливість виконання більш високоякісних різів у полиць балок і в важкодоступних місцях при скороченні кількості вторинних операцій. Витратні деталі для різання під дуже великим кутом представлені як для повітряного, так і кисневого різання на 130 і 200 А.

Компанія Hypertherm розробляє і виробляє промислові товари для різання, які використовуються компаніями по всьому світу в таких галузях, як суднобудування, авіабудування, вагонобудування, будівництво та багатьох інших. Серед продукції компанії системи різання, які користуються довірою завдяки їх ефективності та надійності, що забезпечує більш високу продуктивність та рентабельність для сотень тисяч підприємств.

Компанія Hypertherm заснована у 1968 р., розташована в Нью-Гемпширі і на 100% знаходиться в спільному володінні більш ніж 1800 співробітників, має дилерську мережу і веде операції по всьому світу.

ОСНОВНІ ВИДИ ПОКРИТТІВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Покриття зварювальних електродів це гомогенізована маса змішаних хімічних сполук, нанесених на спеціальний металевий стрижень. Головне завдання таких речовин складається в забезпеченні необхідних властивостей зварного шва і сприянні правильному, безперебійному горінню дуги при зварюванні. Залежно від кінцевої мети виробляються ті чи інші різновиди електродів з певними властивостями. Їх різноманітність, асортимент постійно оновлюються на ринку. Нижче наведено найбільш важливі існуючі різновиди електродів.

Целюлозні електроди. Такі покриття виготовляються з целюлози (до 50 %), яка складається з органічних матеріалів, де в основному використовується деревне борошно. До складу також можуть входити феросплави, смоли органічного походження, тальк. Целюлозні електроди тонкі, утворюють малу кількість шлаку, який легко видаляється, і є найбільш підходящими для позиційного зварювання (при роботі з вертикальними швами шлак не сповзає вниз). Хороші результати отримують при односторонньому зварюванні в будь-якому положенні та при зварюванні кореня шва на трубопроводах.

В такому випадку зворотний валик шва рівний і відносно акуратний. При нагріванні електроди дисоціюються на водень і діоксид вуглецю, які, в свою чергу, служать в якості захисних газів. Зазвичай використовується джерело постійного струму. За допомогою стабілізаторів для целюлозних електродів може використовуватися змінний струм. За ГОСТом відповідають таким типам електродів: Э42, Э46 та Э50.

Недоліки. Наплавлений метал містить відносно підвищену кількість водню, що знижує пластичність зварного шву, в зв'язку з чим можливі холодні тріщини. Характерні бризки.

Електроди з рутиловим покриттям. Як відомо, рутит це титановий мінерал. Для цього різновиду електродів в покритті використовують концентрат діоксиду титану (TiO_2), що наноситься на сталеві стрижні. Він дає кислий шлак, забезпечує газовий захист з водню, оксидів азоту і вуглецю. Ці електроди використовуються для низьковуглецевих сталей в будь-яких просторових положеннях. У класифікації ГОСТу по механічних властивостях можна порівняти з типом Э42 та Э46. Додавання невеликої кількості целюлози в рутилові електроди забезпечує додатковий запас для газового захисту. Іноді незначне додавання целюлози в рутит дає подальше підвищення продуктивності, така комбіна-

ція називається рутил-целюлозне покриття (RC). Крім того, можуть бути комбінації з основними і кислими покриттями (RB і RA відповідно).

Особливості. У порівнянні з електродами на кислій основі, рутилові при зварюванні виробляють метал більш стійкий до тріщин, вони дають менше бризок і стабільне, сильне горіння зварювальної дуги при змінному струмі. Відносно не сприйнятливі до іржі, окислення, вологи. Рутилові електроди дають просто відокремлюваний шлак, відмінно показують себе при зварюванні вертикальних швів. Пористість можлива в окремих випадках при порушенні технології зварювання, наприклад, якщо для тонкого металу застосовуються занадто товсті електроди або є зазори в таврових з'єднаннях. Чудово показують себе на ділянках з короткими швами, де необхідні часті перерви і повторне підпалювання дуги.

Слабкі сторони. Рутилові електроди, що потрапили під вплив вологи, можна використовувати лише через добу (потрібно попереднє прожарювання близько години при температурі вище 200 °C). Небажано їх експлуатація для зварювання конструкцій, що піддаються високим температурам і повзучості.

Електроди з кислим покриттям. Зазначений тип покриття електродів містить оксиди металів, включаючи оксид заліза, силікати і оксиди марганцю, які виробляють кислий шлак. Співвідносяться за ГОСТом з типами Э38 та Э42. Можуть використовуватися з постійним і змінним струмом. У зв'язку з високим вмістом кисню електроди з кислим покриттям підвищують температуру, роблячи метал сильно текучим. З одного боку, ці особливості сприяють швидкому зварюванню, а з іншого можуть привести до появи пор, низької міцності зварного шву та підрізів. Для нівелювання цього додаються деякі розкислювачі, що поліпшують механічні властивості і здатність шлаку легко віддалятися.

Позначення типів покриттів електродів

Міжнародне позначення ISO	Позначення по ГОСТ 9466-75	Тип покриття електродів
A	A	Целюлозне
B	Б	Рутилове
R	P	Кисле
C	Ц	Основне
AR	AP	Кислорутилове
RB	PБ	Рутилово-основне
RC	PЦ	Рутилово-целюлозне
S	П	Інші (змішані)
RR	PЖ	Рутилові з залізним порошком



Недоліки. Подовжена дуга, наявність іржі, окислів суттєво підвищують ймовірність гарячих тріщин і пор в зварному шві. Електроди з кислим покриттям підвищують вміст водню в зварювальній ванні. Вони токсичні, мають підвищене виділення брызг.

Основні електроди або електроди з низьким вмістом водню. Базовий електрод містить карбонат кальцію, карбонат магнію, фторид кальцію та інші мінерали (такі як плавииковий шпат). Ці електроди повинні зберігатися в сухому стані і правильно підігріватися перед використанням. Газовий захист включає вуглекислий газ з низьким вмістом водню та кисню. Контроль водню забезпечує захист від впливу атмосфери, робить електроди придатними для високо- і низьколегованих сталей, для сталей з низьким вмістом вуглецю. При зварюванні під впливом високих температур дуги відбувається дисоціація карбонатів, яка в кінцевому підсумку сприяє підвищеній основності шлаків, появі захисного середовища газів практично без виділення водню. Додатково водневу складову пов’язує фтористий кальцій. Через такі особливості різновид отримав свою другу назву – фтористо-кальцієві електроди. Вони незамінні для споруд із жорсткою основою, для загартованих сталей, схильних для появи холодних тріщин,

а також утворюють шви, не схильні до швидкого старіння. Електроди з низьким вмістом водню для ручного дугового зварювання використовують незалежно від просторового положення. Шви можуть бути значної товщини. Тип відповідно до ГОСТ 9467-75 з механічними властивостями, що наплавляється, близький до Э42А–Э50А.

Слабкі сторони. Можливе виникнення пор у разі, якщо зварюваний метал матиме іржу, окислення. Дуга при горінні менш стабільна ніж у інших видів електродів. Застосовується переважно з постійним струмом. Для змінного струму потрібен поташ або спеціальні калій-натрієві з’єднання, поєднані з прогріванням електродів (до 400 °С).

Електроди з домішкою залізного порошку. Залізний порошок додають в усі типи покриттів для підвищення ефективності електродів. Додатковий порошок заліза збільшує швидкість осадження. Це зменшує напругу, дозволяє целюлозним електродам впоратися зі змінним струмом. Крім того, добавка контролює в’язкість шлаку. Властивість дуже корисна для зварювання в різних положеннях.

Покриття зварювальних електродів відрізняється своїми параметрами, властивостями, сферою застосування.

Тип покриття електродів	Переваги	Недоліки	Застосування
Целюлозне	Хороший провар. Мало шлаку.	Високі концентрації водню при зварюванні. Шов середньої якості. Хороші показники в основному для кореня шва. Для змінного струму потрібно застосування додаткового обладнання.	При зварюванні трубопроводів (особливо для кореня шва). Робота в важкодоступних місцях. Одностороннє зварювання в будь-якому положенні.
Рутилове	Зниження витрат. Стабільна дуга. Просто формується шов. Постійний і змінний струм. Просте зберігання.	При зварюванні характерні висока плинність і низька хімічна чистота металу шва. Зварювальна ванна має відносно підвищені концентрації водню.	Зварювання конструкцій з маловуглецевих і низьколегованих сталей в будівництві та машинобудуванні. Горизонтальне положення.
Кисле	Зниження витрат. Стабільна дуга. Шлак легко видаляється. Постійний і змінний струм. Просте зберігання. Високий ступінь розкислення.	Значна кількість водню в металі шва. Недостатня хімічна чистота. Висока плинність металу шва при зварюванні. Токсичність.	Низьковуглецеві сталі. Зварювання в горизонтальному положенні.
Основне	Хороша хімічна чистота і механічні характеристики шва, особливо в плані ударної в’язкості. Мінімальна кількість водню в металі, що наплавляється.	Складнощі при зберіганні. Нестабільна і коротка дуга. Можуть виникати труднощі при відділенні шлаку.	Для легованих сталей. Для ручного дугового зварювання розкислених спокійних сталей з підвищеним вмістом вуглецю. Для зварювання металу великої товщини, а також конструкцій, що працюють при великих динамічних і знакозмінних навантаженнях. Застосовується у всіх просторових положеннях.