

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ 2023 ²

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

МЕТАЛОЗНАВСТВО

Лобанов Л.М., Сизоненко О.М., Рябцев І.О., Пащин М.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П., Торпаков А.С., Міходуй О.Л., Соломіїчук Т.Г. Удосконалення технології виготовлення модифікаторів системи Ti-TiC та дослідження їх впливу на структуру наплавленого металу типу 25X5ФМС 3

Покляцький А.Г., Мотрунич С.І., Федорчук В.Є., Клочков І.М. Міцність та структура стикових, напусккових і кутових з'єднань сплаву АМг6М, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням 10

ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРІВ

Кораб М.Г., Юрженко М.В., Ковальчук М.О., Паршутіна Л.С., Чукашкін О.М. Дослідження структури зварних з'єднань полімерів з використанням ефекту Ребіндера 18

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Борисова А.Л., Кільдій А.І., Цимбаліста Т.В., Васильківська М.А. Детонаційні покриття на основі інтерметаліду TiAl з добавками неметалевих тугоплавких сполук 24

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

Ланкін Ю.М., Байштрук Є.М., Семікін В.Ф., Романова І.Ю. Машина для контактного точкового мікрозварювання 34

СЕРТИФІКАЦІЯ

Костін О.М. Рекомендації щодо випробувань зварюваності при сертифікації виробництва суднобудівних сталей 40

ОХОРОНА ПРАЦІ

Левченко О.Г., Полукаров Ю.О., Гончарова О.М., Безушко О.М. Гігієнічна характеристика магнітних полів при різних способах дугового зварювання 46

ІНФОРМАЦІЯ

Чинні патенти ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ на корисні моделі 53

Доклади 75-ї щорічної асамблеї МІЗ 59

Жінки ІЕЗ ім. Є.О. Патона в науці 61

CONTENT

METAL SCIENCE

Lobanov L.M., Syzonenko O.M., Ryabtsev I.O., Pashchyn M.O., Babinets A.A., Lentjugov I.P., Torpakov A.S., Mikhoduj O.L., Solomiichuk T.G. Improvement of technology of producing Ti-TiC modifiers and studying their impact on the structure of deposited metal of type 25Kh5FMS 3

Poklyatskyi A.G., Motrunich S.I., Fedorchuk V.E., Klochkov I.M. Strength and structure of butt, overlap and fillet joints of AMg6M alloy produced by friction stir welding 10

WELDING POLYMERS

Korab M.G., Yurzenko M.V., Kovalchuk M.O., Parshutina L.S., Chukashkin O.M. Investigations of the structure of welded joints of polymers using the Reh binder effect 18

PROTECTIVE COATINGS

Borysova A.L., Kildii A.I., Tsybalyista T.V., Vasylykivska M.A. Detonation coatings based on TiAl intermetallics with additions of non-metallic refractory compounds 24

WELDING EQUIPMENT

Lankin Yu.M., Bayshtрук E.M., Semikin V.F., Romanova I.Yu. Machine for resistance spot microwelding 34

SERTIFICATION

Kostin O.M. Recommendations on weldability testing at certification of shipbuilding steel production 40

OCCUPATIONAL HEALTH

Levchenko O.G., Polukarov Yu.O., Goncharova O.M., Bezushko O.M. Hygienic characteristic of magnetic fields at different arc welding methods 46

INFORMATION

Current patents of E.O. Paton Electric Welding Institute for useful models 53

Proceedings of 75th annual assembly of IIW 59

Women of E.O. Paton Electric Welding Institute in science 61



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну в Міжнародному інституті зварювання та в Європейській зварювальній федерації

The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine in International Institute of Welding and in European Federation for Welding



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

Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Засновники

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

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію КВ 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2023

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

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150, 11 Kazymyr Malevych Str.
Tel./fax: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal

Certificate of state registration

of KV 4788 dated 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Subscription 2023

Subscription index 70031.

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

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

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

Subscription is possible for previous issues for any year.

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

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

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

Підписано до друку 03.03.2023.
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7,44
Друк ТОВ «ДІА».
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ МОДИФІКАТОРІВ СИСТЕМИ Ti–TiC ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ВПЛИВУ НА СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ТИПУ 25X5ФМС

Л.М. Лобанов¹, О.М. Сизоненко², І.О. Рябцев¹, М.О. Пашин¹, А.А. Бабінець¹, І.П. Лентюгов¹,
А.С. Торпаков², О.Л. Міходуй¹, Т.Г. Соломійчук¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. 54018, м. Миколаїв, просп. Богоявленський, 43, а.
E-mail: dioo@iipr.com.ua

Удосконалено технологію виготовлення модифікаторів системи Ti–TiC, що дозволило зменшити середній діаметр його частинок більше ніж у 6 разів. Використання запропонованої методики обробки дозволило отримати порошок Ti–TiC із не менш ніж 20 % TiC у його складі. Встановлено, що обробка у газі для досліджених режимів є більш ефективною з точки зору диспергування, аніж обробка у етанолі. Використання отриманого порошку в якості модифікатора при його вмісті в наплавленому металі 25X5ФМС на рівні 0,01 % призводить до значної зміни мікроструктури й перетворенню її зі стовпчастої в коміркову. Найбільш перспективно, з точки зору можливості керування структурою і властивостями наплавленого металу, виглядає використання модифікованих порошоків Ti–TiC типу H2 та H4, які одержані у результаті високовольтної обробки суміші відповідних порошоків у вуглеводневій рідині з використанням режиму об'ємно-розподіленого багатоіскрового розряду. Це дозволяє значним чином впливати на структуру наплавленого металу типу 25X5ФМС, але при цьому не призводить до утворення в наплавленому металі мікротріщин. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: модифікування, технологія виготовлення модифікаторів, високовольтна обробка, вуглеводнева рідина, дугове наплавлення, порошковий дріт, наплавлений метал, структура наплавленого металу, неметалеві включення

Вступ. Введення в розплав металів різних типів модифікаторів є досить поширеним прийомом подрібнення їх структури та підвищення механічних та службових властивостей. Модифікатори та мікролегуєчі елементи використовують також для подрібнення структури та запобігання спрямованості росту кристалітів при затвердінні зварювальної ванни у наплавлувальному та зварювальному виробництві [1–8]. У технічній літературі є дані про застосування модифікаторів, що містять бор або ітрій, для подрібнення структури та підвищення службових властивостей наплавленого металу [2, 3]. Однак модифікатори, що містять зазначені елементи, є дуже дорогими, що не завжди виправдовує їх використання з економічної точки зору.

В роботі [9] на прикладі застосування модифікатора Ti–TiC при литті показано, що його введення дозволило зменшити розмір зерна та підвищити механічні характеристики жароміцного сплаву СМ88У. Це свідчить про перспективність використання металевих порошоків Ti–TiC для модифікування та мікролегування наплавленого металу різних систем легування.

Технологію отримання модифікатора Ti–TiC розроблено в Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України. За цією технологією для виготовлення модифікаторів Ti–TiC використовується обробка суміші відповідних порошоків високовольтним електричним розрядом (ВЕР) у вуглеводневій рідині.

ВЕР у рідині є унікальним комплексним методом впливу на різні дисперсні системи з метою їх диспергування, яке супроводжується зміною структури та фазового складу останніх. ВЕР характеризується миттєвим виділенням значної кількості енергії (одиниці, десятки або сотні кДж) у первісно невеликому об'ємі каналу розряду протягом мікросекунд. Висока концентрація енергії в плазмовому каналі розряду призводить до виникнення в об'ємі розрядної камери електромагнітних та термічних полів, інтенсивних хвиль тиску, гідропотоків, об'ємної мікрокавітації та електроерозійних процесів, які сприяють диспергуванню та еволюції структури дисперсних систем [10, 11].

У роботі досліджено можливість використання модифікатора Ti–TiC для подрібнення струк-

Лобанов Л.М. Scopus Author ID 6603876807, Пашин М.О. Scopus Author ID 7801572218

Міходуй О.Л. Scopus Author ID 36189953300, Сизоненко О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8449-2481>

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

Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>, Торпаков А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9805-3914>

Соломійчук Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-3038-8291>

© Л.М. Лобанов, О.М. Сизоненко, І.О. Рябцев, М.О. Пашин, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, А.С. Торпаков, О.Л. Міходуй, Т.Г. Соломійчук, 2023

тури металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС, а також наведено результати вдосконалення технології виготовлення модифікатора Ti–TiC з використанням різних технологічних режимів та вуглеводневих рідких середовищ.

Таким чином, метою роботи є вдосконалення технології виготовлення модифікатора Ti–TiC, отриманого із застосуванням ВЕР, та дослідження його впливу на структуру наплавленого металу типу 25Х5ФМС.

Методики досліджень. Вдосконалення технології виготовлення модифікатора Ti–TiC з використанням ВЕР виконувалось на експериментальному стенді, схему якого наведено на рис. 1, а принцип роботи – у статті [11].

Дослідження ВЕР в дисперсній системі «рідкий діелектрик – порошок металу» виконували при напрузі зарядки конденсаторів $U = 50$ кВ, індуктивності розрядного контуру $L = 0,7$ мкГн та розрядному проміжку l_p , який обирався в залежності від робочої рідини і складав ~ 17 мм для гасу і ~ 24 мм для етанолу. Ємність накопичувача C складала $0,8$ мкФ, тому значення запасеної енергії одиничного розряду W_1 складало 1 кДж. Питома енергія обробки становила 20 МДж/кг. Згідно результатів, наведених у роботах [10, 11], саме такі значення параметрів ВЕР-обробки дозволяють досягнути балансу між подрібненням, кількістю синтезованого порошку карбіду титану та кількістю частинок вільного нановуглецю.

Використання гасу в якості робочого середовища при обробці сумішей порошків дозволяє синтезувати нановуглець різних алотропних модифікацій в результаті піролізу вуглеводневих ланцюгів плазмою каналу розряду. Активний нановуглець здатен вступати в реакції з порошком Ti, внаслідок чого можливий синтез карбіду титану [12]. За рахунок зміни складу вуглеводневої рі-

дини можливе керування кількістю синтезованого нановуглецю, тому у роботі в якості робочого середовища для реалізації ВЕР використовували гас та етанол. Співвідношення твердої та рідкої фази при дослідженнях складало $1:15$ (маса оброблюваного порошку складала 100 г, об'єм робочої рідини – $1,5$ дм³).

При кожній обробці виконували запис осцилограм розрядних струму та напруги через кожні 100 розрядів. Значення електричних та гідродинамічних характеристик для кожної із обробок усереднювали згідно результатам розрахунків для записаних осцилограм. Для кожного із наведених режимів виконували не менш, ніж три експерименти.

Виконували обробку ВЕР порошку Ti із застосуванням одновістрійної та тривістрійної електродних систем (ЕС) у середовищі гасу або етанолу. При використанні системи «одне вістря – площа» ВЕР розвивається за класичним механізмом іскрового розряду (ІР) у дисперсній системі, тоді як використання ЕС типу «три вістря – площа» дозволяє реалізувати режим об'ємно-розподіленого багатоіскрового розряду (ОБР). Отримані в результаті обробки модифікатори були позначені відповідно Н1 та Н2 (середовище гас) і Н3 та Н4 (середовище етанол) (таблиця).

Для оцінки ступеня впливу ВЕР у вуглеводневому середовищі на морфологію та розміри частинок порошків використовували оптичний мікроскоп БЮЛАМ-І з максимальним збільшенням $\times 1350$, растровий електронний мікроскоп РЕМ-МА-102 з діапазоном збільшень від 10 до $\times 250000$ та цифрову фотокамеру Canon. Проби порошку для оптичної мікроскопії відбирали відповідно до ГОСТ 23402-78.

Дослідження фазового складу порошків виконувалося методом рентгенофазового аналізу

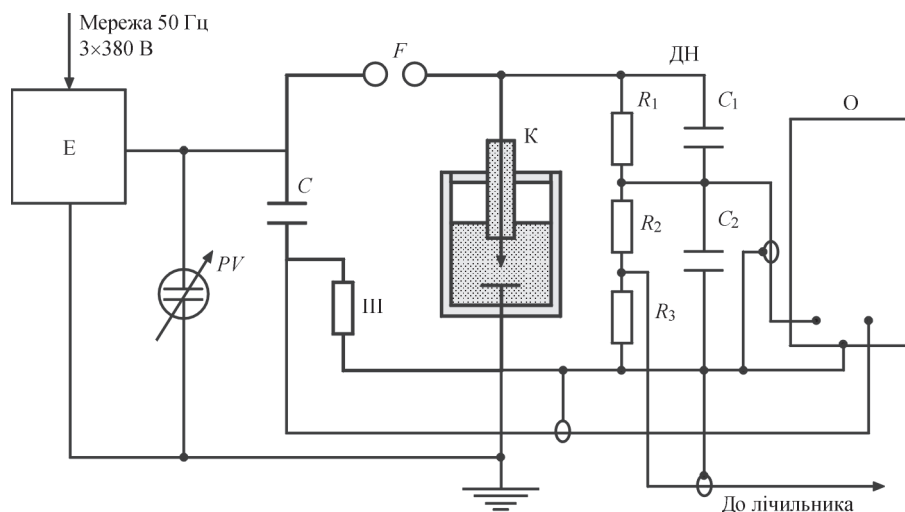


Рис. 1. Схема експериментального стенду для електророзрядної обробки порошків: Е – енергетична частина; PV – кіловольметр; С – ємнісний накопичувач; Ш – коаксіальний шунт; К – робоча камера; О – запам’ятовуючий осцилограф; F – повітряний розрядник; ДН – дільник напруги; R1, R2, R3, C1, C2 – елементи дільника напруги

за допомогою дифрактометру ДРОН-4-07 при $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні. Ідентифікація фаз на дифрактограмах здійснювалася за базами POW_COD. Кількісний фазовий склад визначався за методикою оцінки інтенсивності з використанням корундового числа RIR (Reference Intensity Ratio) із застосуванням програми QualX і повного профільного аналізу із застосуванням програми Maud.

Зразки для дослідження мікроструктури отримували шляхом дугового наплавлення порошковими дротами на пластини зі сталі 40X. Для наплавлення використовували порошковий дріт ПП-Нп-25X5ФМС, у шихту якого додавали порошки модифікаторів з таким розрахунком, щоб отримати вміст модифікатора в наплавленому металі на рівні 0,01 %. В якості еталону використовували зразки, наплавлені порошковим дротом ПП-Нп-25X5ФМС без модифікаторів. Діаметр всіх розроблених дротів – 1,8 мм, коефіцієнт заповнення – 25 %. Усього було виготовлено п'ять дослідних порошкових дротів (див. таблицю).

Наплавлення всіх зразків виконували під флюсом АН-26П на однаковому режимі: струм 220...230 А, напруга 36...37 В, швидкість наплавлення 25 м/год. З метою уникнення впливу переміщення основного металу, на кожному зразку наплавлення виконувалось у чотири шари. З метою уникнення кристалізаційних тріщин перед наплавленням зразки підігрівали до 200 °С, а після наплавлення охолоджували разом з піччю. Після повного остигання з наплавлених зразків вирізали поперечні заготовки для підготовки відповідних мікрошліфів і проведення металографічних досліджень.

Зразки для металографічних досліджень були підготовлені за стандартними методиками. Для виявлення мікроструктури зразки були протравлені електролітично в 20 %-му розчині хромової кислоти при напрузі 20 В.

Дослідження мікроструктури та неметалевих включень наплавленого металу проводили на мікроскопі НЕОРНОТ-32. Вимірювання твердості проводили на твердомірі М-400 фірми LECO при навантаженні 100 г та 1 кг. Фотографії мікроструктур отримані за допомогою фотокамери OLYMPUS C-500.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати дослідження зміни дисперсності порошку Ті після ВЕР-обробки на різних режимах наведено на рис. 2. Вихідний порошок титану мав моноmodalний розподіл частинок за розмірами, пік якого знаходився в точці, яка відповідає діаметрові ~ 30 мкм, при цьому 54 % частинок порошку мали розмір, менший за це значення (див. рис. 2, крива 1), а середній діаметр такого порошку складав 60 мкм.

Аналізуючи наведені на рис. 2 результати, слід зазначити, що ВЕР-обробка у всіх досліджених режимах дозволила значно зменшити середній діаметр частинок порошку та змінити характер його розподілу за розмірами. Так, ВЕР-обробка у гасі у режимі ІР дозволила отримати порошок системи Ті–ТіС із середнім діаметром 8,2 мкм. Розподіл такого порошку за розмірами мав біmodalний характер (крива 2) – один із піків був близьким до вихідного діапазону розмірів та становив 7,5 мкм (32 %), а інший знаходився у діапазоні розмірів менше за 1 мкм (0,6 мкм, 37 %).

Зміна режиму обробки на ОБР із збереженням гасу у якості робочого середовища дозволила збільшити ефективність диспергування – отриманий порошок системи Ті–ТіС мав середній діаметр 7,4 мкм. Він характеризувався майже моноmodalним розподілом (крива 3), основний пік якого знаходився у точці, яка відповідає діаметру 0,7 мкм (44 %). Саме такий режим був найбільш ефективним з точки зору диспергування частинок порошку.

Зміна робочого середовища з гасу на етанол при реалізації режиму ІР дозволила отримати порошок системи Ті–ТіС із середнім діаметром 12,1 мкм. Розподіл цього порошку за розмірами був біmodalним (крива 4) – на ньому спостерігались піки у точках 10 мкм (35 %) та 0,8 мкм (21 %).

Зміна режиму розряду на ОБР шляхом заміни електродної системи «одне вістря – площа» на електродну систему «три вістря – площа» із збереженням етанолу в якості робочого середовища ВЕР дозволила підвищити ефективність диспергування у етанолі. Отриманий порошок системи Ті–ТіС характеризувався середнім діаметром 10,2 мкм, а його розподіл за розмірами мав моноmodalний характер (крива 5) із піком у точці, яка відповідає діаметру 7,5 мкм (40 %).

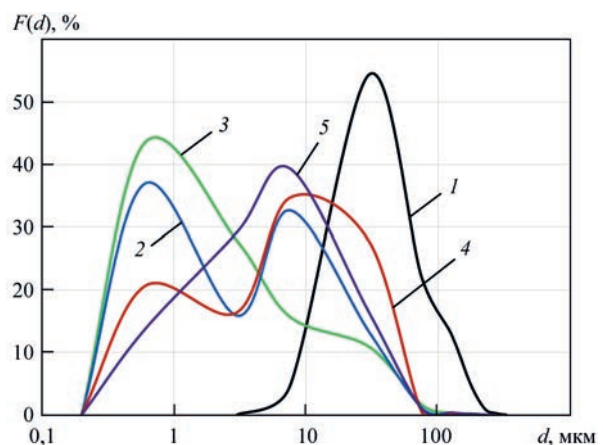


Рис. 2. Розподіл частинок порошку модифікаторів за розмірами d до та після ВЕР-обробки при різних режимах: 1 – вихідний порошок Ті; 2 – модифікатор Н1, середовище обробки – гас, режим ІР; 3 – модифікатор Н2, середовище обробки – гас, режим ОБР; 4 – модифікатор Н3, середовище обробки – етанол, режим ІР; 5 – модифікатор Н4, середовище обробки – етанол, режим ОБР

Таким чином, обробка порошку Ti у всіх розглянутих режимах дозволила знизити його середній діаметр більше ніж у 6 разів. Обробка із реалізацією ОБР дозволяє отримати практично моноmodalний розподіл частинок за розмірами та відрізняється більшою ефективністю диспергування. Обробка у гасі для досліджених режимів є більш ефективною з точки зору диспергування, аніж обробка у етанолі.

Отримані у результаті дослідження дифрактограми зразків оброблених порошків на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4 наведено на рис. 3. На всіх дифрактограмах окрім піків, характерних для Ti, з'являються також піки, які свідчать про синтез TiC в процесі ВЕР-обробки вихідного порошку титану.

Результати кількісного аналізу методом RIR свідчать, що кількість синтезованого карбіду титану для всіх досліджених режимів відрізняється у межах похибки (таблиця). Дещо кращі з точки зору ефективності карбідизації результати спостерігались при обробці у етанолі у режимі IP, але всі режими дозволили отримати не менш, ніж 20 % TiC у складі порошку після його обробки.

Ці результати підтверджують висновок, зроблений у роботах [8, 9], що на ефективність карбідизації порошку Ti у найбільшій мірі впливає питома енергія обробки, яка для всіх досліджених режимів була сталою та становила 20 МДж/кг.

Досліджували мікроструктуру металу, наплавленого п'ятьма дослідними порошковими дротами (рис. 4, а–д та рис. 5 а, б).

Мікроструктура зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС без додавання модифікатора (таблиця, рядок 1), складається зі стовпчастих кристалітів (рис. 4, а), які ростуть у напрямку тепловідводу. Ширина кристалітів перебуває у межах 30...60 мкм. У тілі кристалітів спостерігається голчаста мартенситна структура, по границях литих кристалітів спостерігаються світлі виділення, які відповідають залишковому аустеніту (рис. 4, а). Дуже рідко спостерігаються виділення округлої форми, які можуть являти собою складні карбіди. Твердість наплавленого металу складає $HV1 - 5920...6060$ МПа. Дефекти як в наплавленому металі, так і поблизу лінії сплавлення – відсутні.

Мікроструктура металу зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС із вмістом модифіка-

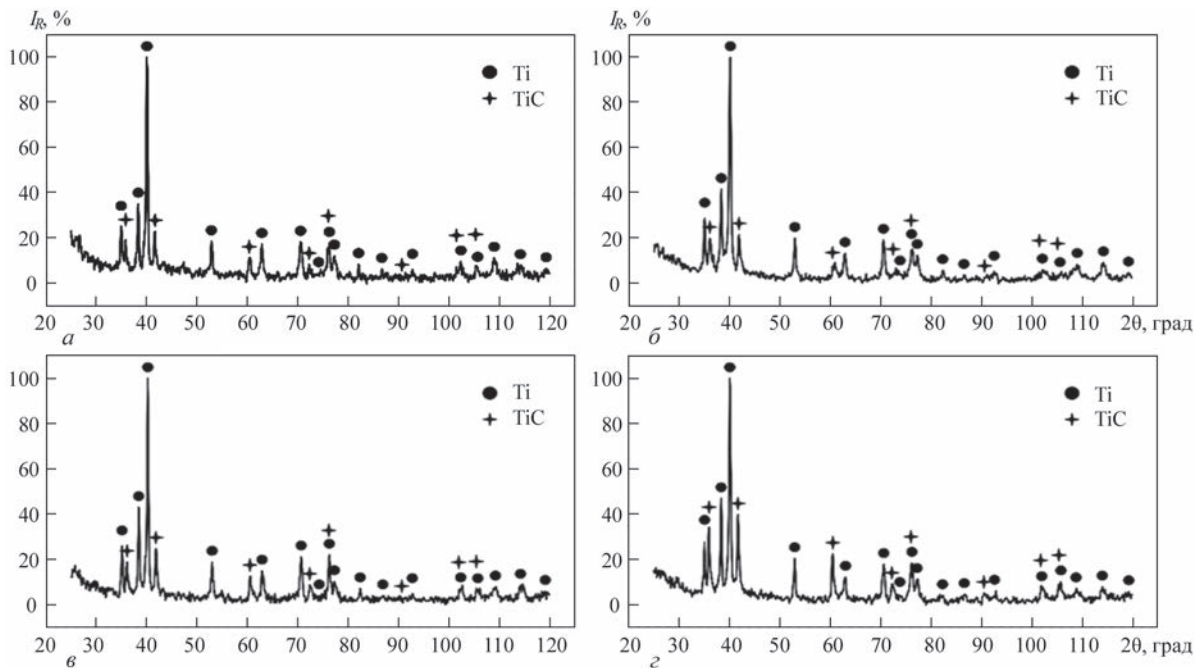


Рис. 3. Дифрактограми порошкової суміші системи Ti–TiC, отриманої шляхом ВЕР-обробки порошку титану: а – модифікатор Н1, середовище обробки – гас, режим IP; б – модифікатор Н2, середовище обробки – гас, режим ОБР; в – модифікатор Н3, середовище обробки – етанол, режим IP; з – модифікатор Н4, середовище обробки – етанол, режим ОБР

Характеристики металу, наплавленого порошковими дротами ПП-Нп-25Х5ФМС, що містять модифікатори Ti–TiC, які отримані з використанням ВЕР-обробки на різних режимах

| Позначення модифікатора | Робоче середовище | Режим розряду | Вміст TiC у порошку після обробки, % | Розмір кристалітів ϵ_s , мкм/тип структури | Твердість наплавленого металу $HV1$, МПа |
|-------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------------|---|---|
| Без модифікатора | – | – | – | 30...60/стовпчаста | 5920...6060 |
| Н1 | Гас | IP | 20 | 30...180/комірчаста | 6410...6420 |
| Н2 | Гас | ОБР | 23 | 20...80/комірчаста | 5700...5800 |
| Н3 | Етанол | IP | 20 | 35...170/комірчаста | 6350...6600 |
| Н4 | Етанол | ОБР | 23 | 30...100/комірчаста | 5250...5330 |

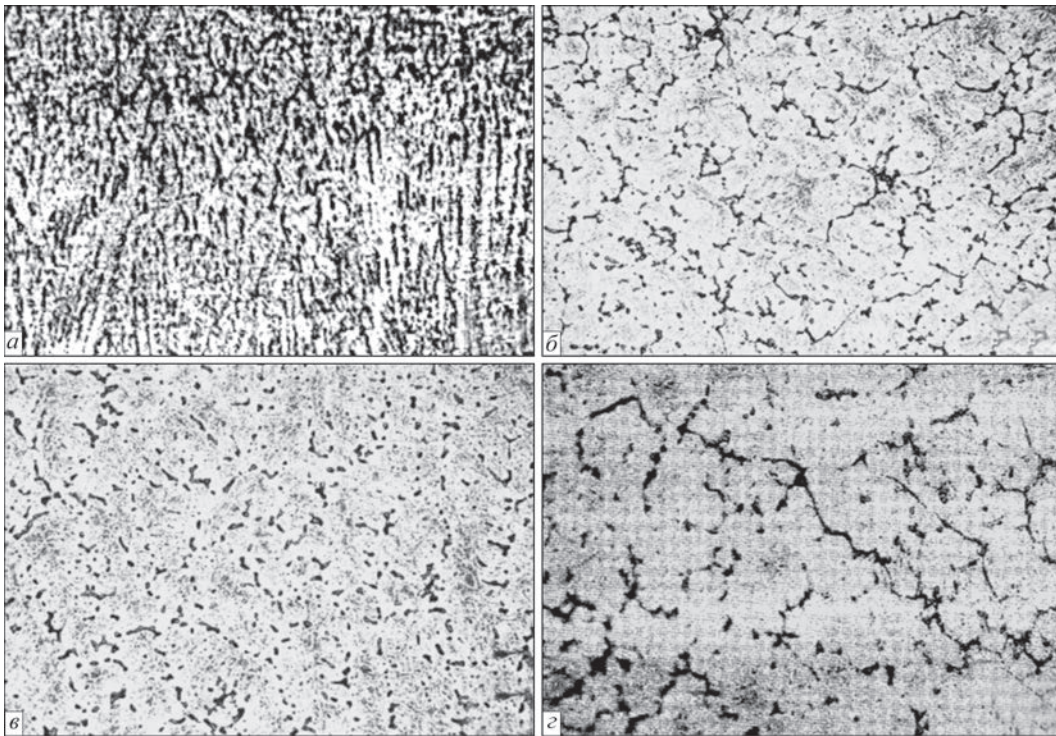


Рис. 4. Мікροструктура ($\times 200$) металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС: *a* – без мікролегуючих добавок; *b* – із застосуванням модифікатора Н1; *c* – Н2; *d* – Н3

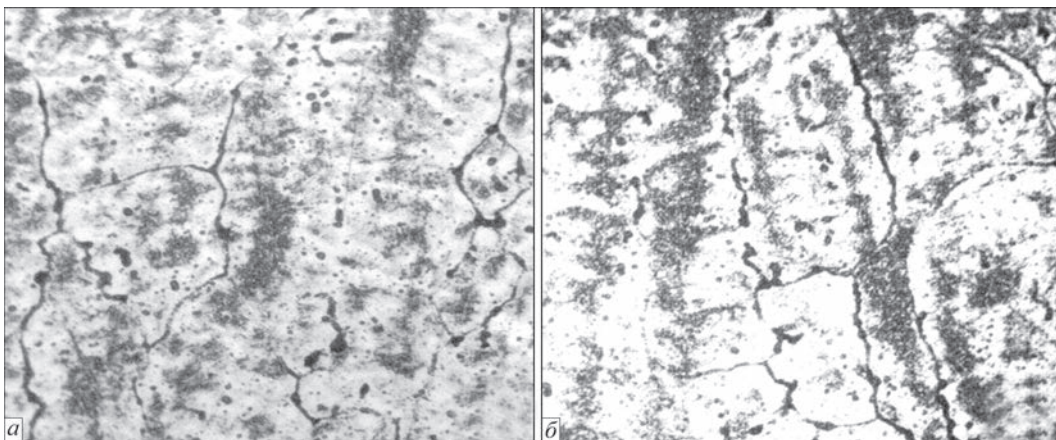
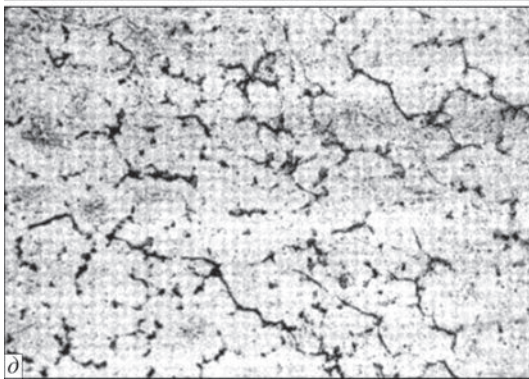


Рис. 5. Мікροструктура ($\times 600$) металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС, з мікροтріщинами: *a* – із застосуванням модифікатора Н1; *b* – Н3

тора Н1 зі складом 80 % Ti+20 % TiC (таблиця, рядок 2), подрібнилася (рис. 4, б). Подрібнилась також структура мартенситу. Розмір комірок перебуває в межах 30...180 мкм. По границях комірок спостерігається досить велика кількість темнотравної фази й округлих виділень, які вибудовуються в ланцюжки й, імовірно,

можуть являти собою карбіди. Крім того, у верхньому шарі наплавленого металу спостерігаються мікροтріщини, що небажано (рис. 5, а). Твердість наплавленого металу складає $HV1 - 6410...6420$ МПа.

Мікροструктура металу зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС із вмістом модифі-

катора Н2 зі складом 77 % Ti + 23 % TiC (таблиця, рядок 3), представляє литу комірчасту структуру (рис. 4, в). В тілі кристалітів спостерігається великогочаста мартенситна структура з твердістю $HV_{0,1} - 4900...5450$ МПа. По границях литих кристалітів спостерігається світлотравлена аустенітна структура з твердістю $HV_{0,1} - 5100$ МПа з небагатьма виділеннями карбідів та інтерметалідів. Інтегральна твердість цього зразка знаходиться в межах $HV1 - 700...5800$ МПа. Розмір комірок – 20...80 мкм. Мікротріщин у цьому зразку не виявлено.

Досліджували мікроструктуру зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС із вмістом модифікатора Н3 зі складом 80 % Ti + 20 % TiC (таблиця, рядок 4; рис. 4, г). Вона представляє собою матрицю, що складається зі слаботравлених дисперсних голок мартенситу із виділеннями карбідів або інтерметалідів, або тих і тих по границях литих кристалітів у вигляді окремих або ланцюжкових включень (рис. 4, г). Твердість мартенситної матриці складає $HV_{0,1} - 5700...5750$ МПа, а інтегральна твердість знаходиться в межах $HV1 - 6350...6600$ МПа. Розмір комірок 35...170 мкм. У цьому зразку, як і зразку з модифікатором Н1, у верхніх шарах наплавленого металу виявлені мікротріщини (рис. 5, б).

Необхідно відмітити, що модифікатори Н1 та Н3 були виготовлені із застосуванням ВЕР-обробки у режимі ІР. На відміну від цього, модифікатори Н2 та Н4 виготовлялися із застосуванням ВЕР-обробки у режимі ОБР. Як було показано вище, обробка в режимі ОБР забезпечує отримання більшої кількості карбідів титану менших розмірів. Це, на нашу думку, і є однією з причин відсутності мікротріщин у наплавленому металі з модифікаторами Н2 та Н4.

Мікроструктура зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС із вмістом модифікатора Н4 зі складом 77 % Ti + 23 % TiC (таблиця, рядок 5), також значно подрібнилася (рис. 4, д). По границях комірок спостерігаються темнотравні виділення, однак кількість цих виділень менше, ніж в аналогічній ділянці зразка з модифікатором Н1, крім того, вони не зливаються у довгі ланцюжки. Мікротріщин в цій зоні також не відмічено. Твердість наплавленого металу становить $HV1 - 5250...5330$ МПа.

Також відповідно до методики ГОСТ 1778-70 на полірованих нетравлених мікрошліфах визначали рівень забруднення неметалічними включеннями наплавленого металу. Із представлених зразків найсильніше забруднення неметалічними включеннями, в основному оксидами, наплавленого металу спостерігається в зразку без модифікаторів. Воно відповідає балу № 3а по таблиці

«Оксиди точкові» ГОСТ 1778-70. Зразки з модифікаторами Н1, Н2, Н3 суттєво чистіші по неметалічних включеннях у порівнянні зі зразком без модифікаторів і їх забруднення відповідає балу № 1а тієї ж таблиці. В зразку з модифікатором Н4 забруднення наплавленого металу неметалічними включеннями найменше й становить менше бала № 1а таблиці «Оксиди точкові».

Висновки

1. Метод ВЕР-обробки на різних режимах у вуглеводневій рідині порошку системи Ti–TiC дозволив зменшити середній діаметр його частинок більше ніж у 6 разів. В результаті було отримано порошок з практично моноmodalним розподілом частинок за розмірами.

3. Використання отриманого порошку системи Ti–TiC в якості модифікатора при його вмісті в наплавленому металі типу 25Х5ФМС на рівні 0,01 % призводить до значної зміни мікроструктури й перетворенню її зі стовпчастої в коміркову.

3. Найбільш перспективно, з точки зору можливості керування структурою і властивостями наплавленого металу, виглядає використання у якості модифікаторів порошоків Ti–TiC типу Н2 та Н4, які дозволяють значним чином впливати на структуру наплавленого металу типу 25Х5ФМС, але, при цьому, не призводять до утворення в наплавленому металі мікротріщин за рахунок наявності у складі цих модифікаторів більшої кількості карбідів титану менших розмірів.

Список літератури

1. Бабінець А.А., Рябцев І.О. (2021) Вплив модифікування та мікролегування на структуру та властивості наплавленого металу (огляд). *Автоматичне зварювання*, **10**, 3–11.
2. Гладкий П.В., Микаелян Г.С. (1992) *Микролегирувание и модифицирование износостойкого наплавленного металла. Наплавленный металл. Состав, структура, свойства*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 33–36.
3. Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентогов І.П., Богайчук І.П. (2022) Вплив мікролегування бором на структуру та властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25Х5ФМС. *Автоматичне зварювання*, **6**, 3–11.
4. Krivchikov, S.Yu. (2012) Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *The Paton Welding J.*, **6**, 19–21.
5. Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V., Goncharenko, E.I. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *Ibid*, **6-7**, 76–79. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.15>
6. Kuznetsov, V.D., Stepanov, D.V. (2015) Structure and properties of weld metal modified by nanooxides. *Ibid*, **11**, 10–16. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.11.01>
7. Stepanov, K.K., Matvienko, V.N., Oldakovsky, A.I. (2011) Modification of medium-chromium deposited metal. *Ibid*, **8**, 10–12.
8. Pu, J., Yu, Sh., Li, Yu. (2017) Effects of Zr-Ti on the microstructure and properties of flux aided backing submerged arc weld metals. *Journal of alloys and compounds*, **692**, 351–358.
9. Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lypyan, E.V. et al. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Materials Science*, **56**, 2, 232–239. ISSN 1068-820X

- (Print), 1573-885X (Electronic). DOI: 10.1007/s11003-020-00421-1
- Липянь Е.В., Сизоненко О.Н., Торпаков А.С., Жданов А.А. (2015) Термодинамический анализ гетерогенных химических реакций в системе «смесь порошков Fe–Ti – углеводородная жидкость» под воздействием высоковольтных электрических разрядов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. Харьков, НТУ «ХПІ»*, 51, 1160, 59–65.
 - Сизоненко О.Н., Трегуб В.А., Липянь Е.В. (2015) Анализ физико-технических процессов при высоковольтной электро-разрядной обработке металлических порошков. *Вестник Украинского материаловедческого общества*, 8, 10–21.
 - Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Й. (1985) *Специальные стали*. Москва, Металлургия, 308–309.
 - Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V., Goncharenko, E.I. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *The Paton Welding J.*, 6-7, 76–79. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.15>
 - Kuznetsov, V.D., Stepanov, D.V. (2015) Structure and properties of weld metal modified by nanooxides. *The Paton Welding J.*, 11, 10–16. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.11.01>
 - Stepnov, K.K., Matvienko, V.N., Oldakovsky, A.I. (2011) Modification of medium-chromium deposited metal. *The Paton Welding J.*, 8, 10–12.
 - Pu, J., Yu, Sh., Li, Yu. (2017) Effects of Zr-Ti on the microstructure and properties of flux aided backing submerged arc weld metals. *J. of Alloys and Compounds*, 692, 351–358.
 - Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lypyan, E.V. et al. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Materials Sci.*, 56, 2, 232–239. ISSN 1068-820X (Print), 1573-885X (Electronic). DOI: 10.1007/s11003-020-00421-1
 - Lypyan, E.V., Syzonenko, O.N., Torpakov, A.S., Zdanov, A.A. (2015) Thermodynamical analysis of heterogeneous chemical reactions in system “mixture of Fe-Ti powders – hydrocarbon liquid” under the action of high-voltage electric discharges. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Tekhnika ta Elektrofizyka Vysokyykh Naprug. Kharkiv*, 51, 1160, 59–65 [in Russian].
 - Syzonenko, O.N., Tregub, V.A., Lypyan, E.V. (2015) Analysis of physico-technical processes in high-voltage electric-discharge treatment of metal powders. *Vestnik Ukr. Mater. Obshchestva*, 8, 10–21 [in Russian].
 - Goldshstejn, M.I., Grachev, S.V., Veksler, Yu.J. (1985) *Special steels*. Moscow, Metallurgiya, 308–309

References

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF PRODUCING Ti-TiC MODIFIERS AND STUDYING THEIR IMPACT ON THE STRUCTURE OF DEPOSITED METAL OF TYPE 25Kh5FMS

L.M. Lobanov¹, O.M. Syzonenko², I.O. Ryabtsev¹, M.O. Pashchyn¹, A.A. Babinets¹, I.P. Lentyugov¹, A.S. Torpakov², O.L. Mikhoduj¹, T.G. Solomiichuk¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: svarka2000@ukr.net

²Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine. 43a Bohoyavlensky Ave., 54018, Mykolaiv,
E-mail: dioo@iippt.com.ua

The technology of producing Ti-TiC modifiers was improved, which reduced the average diameter of its particles by more than 6 times. The use of the proposed processing procedure made it possible to produce a Ti-TiC powder with at least 20 % of TiC in its composition. It was found that for the investigated modes, processing in kerosene is more effective in terms of dispersion than processing in ethanol. The use of the produced powder as a modifier at its content in a deposited metal 25Kh5FMS at the level of 0.01 %, leads to a significant change in the microstructure and its conversion from a columnar into a cellular one. In terms of the possibility to control the structure and properties of the deposited metal, the most promising is the use of modified Ti-TiC powders of H2 and H4 type, which were produced as a result of high-voltage processing of the mixture of corresponding powders in a hydrocarbon fluid using a voluminous-distributed multi-spark discharge mode. This provides a significant effect on the structure of the deposited metal of type 25Kh5FMS, but at the same time does not lead to the formation of microcracks in the deposited metal. 12 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: modification, technology of producing modifiers, high-voltage processing, hydrocarbon fluid, arc surfacing, flux-cored wire, deposited metal, structure of deposited metal, non-metallic inclusions

Надійшла до редакції 28.12.2022



VII Міжнародна конференція

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

Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя

18–20 жовтня 2023 р.

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

МІЦНІСТЬ ТА СТРУКТУРА СТИКОВИХ, НАПУСКОВИХ І КУТОВИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ АМГ6М, ОТРИМАНИХ ЗВАРЮВАННЯМ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

А.Г. Покляцький, С.І. Мотруніч, В.Є. Федорчук, І.М. Клочков

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: pag556a@gmail.com

У статті викладено результати дослідження структури та міцності стикових, напускових і кутових з'єднань алюмінієвого сплаву АМГ6М, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням (ЗТП). Показано, що внаслідок інтенсивної пластичної деформації металу формується ядро шва з дрібнокристалічною структурою. Розмір зерен, які мають практично глобулярну форму, не перевищує 4...5 мкм, а дисперсних фазових виділень – ≤ 1 мкм. У зоні термомеханічного впливу на межі спряження шва з основним матеріалом крім дрібних зерен утворюються дещо більші (6...7 мкм) видовжені зерна, орієнтовані вздовж напрямку переміщення пластифікованого металу робочими поверхнями інструмента. При цьому в зоні термічного впливу, де метал не зазнавав деформаційного впливу, максимальний розмір його зерен знаходиться на рівні 10...15 мкм. Межа міцності зразків стикових з'єднань і кутових з'єднань, отриманих стиковими і напусково-стиковими швами, при їх статичному розтягуванні знаходиться на рівні 335...350 МПа і практично не залежить від розташування зварюваних листів зі сторони набігання чи сторони відходу та орієнтації швів відносно напрямку їх вальцювання. При цьому руйнування зразків стикових з'єднань відбувається здебільшого по основному металу або на межі зон термомеханічного і термічного впливу. Зразки кутових з'єднань, отримані напусково-стиковими швами, руйнуються в зоні спряження шва з основним металом в зоні термомеханічного впливу, а отримані стиковими швами, – ще й по основному металу. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: зварювання тертям з перемішуванням, алюмінієвий сплав АМГ6М, кутові з'єднання, міцність, структура, стикові з'єднання, напускові з'єднання

Вступ. Завдяки фізичним, механічним і технологічним властивостям алюмінію постійно зростають об'єми його застосування у різних галузях. Основними секторами, які визначають світовий попит на алюмінієві сплави, нині є будівництво, упаковка, загальне машинобудування, авіакосмічна техніка, автомобілебудування й енергетика. Алюмінієвий прокат і профілі широко використовуються у промислово-цивільному будівництві, в тому числі для виготовлення легких зварних конструкцій. Застосування алюмінію в автомобілебудуванні дозволяє значно підвищити міцність при зменшенні маси та збереженні розмірів автомобіля, що забезпечує економію палива. В авіакосмічній галузі алюміній давно став основним конструкційним матеріалом і складає майже 80 % від маси фюзеляжу літака. Сучасний світовий ринок алюмінію пропонує споживачам чистий алюміній та близько 300 композицій конструкційних сплавів алюмінію з різними фізико-механічними властивостями. Асортимент товарної продукції з алюмінію та його сплавів включає литі чушки, плоский прокат, профільний прокат, профіль пресований, дріт і фольгу. Тому при виготовленні зварних конструкцій залежно від їх функціонального призначення зазвичай використовуються як різні алюмінієві сплави, так і різноманітні види напівфабрикатів [1].

Зростання об'ємів використання алюмінію нерозривно пов'язане не тільки зі створенням нових добре зварюваних сплавів, але й з удосконаленням існуючих та розробкою перспективних технологій зварювання, які дозволяють розширити сфери їх застосування. Так, інтенсифікація перемішування розплавленого металу зварювальної ванни при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом з коливаннями дуги посприяла зменшенню пористості швів алюмінієво-літєвих сплавів, руйнуванню та подрібненню макровключень оксидної плівки у швах алюмінієво-магнієвих сплавів та формуванню дрібнокристалічної стійкої до розтріскування структури швів [2, 3]. Застосування висококонцентрованих джерел нагрівання при променевих і гібридних способах зварювання дозволило зменшити ступінь розміщення металу в зоні формування нероз'ємного з'єднання та підвищити механічні властивості швів [4]. А розробка процесу ЗТП дозволила отримувати шви без використання захисного інертного газу та зварювального дроту, уникаючи ультрафіолетового випромінювання дуги та процесів розплавлення і кристалізації металу, які призводять до утворення характерних для зварювання плавленням дефектів у вигляді гарячих тріщин, пор і макровключень оксидної плівки [5–7]. У процесі ЗТП внаслідок пластичної деформації

Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>, Мотруніч С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>,

Федорчук В.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Клочков І.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6490-8905>

© А.Г. Покляцький, С.І. Мотруніч, В.Є. Федорчук, І.М. Клочков, 2023

металу створюються сприятливі умови для утворення дрібнокристалічної структури швів [8–10]. Завдяки формуванню нероз’ємних з’єднань при значно нижчих у порівнянні зі зварюванням плавленням температурах ($\leq T_s$) зменшується ступінь розміщення металу, забезпечується високий рівень механічних властивостей з’єднань і низький рівень залишкових напружень і деформацій [11–13]. Переваги процесу ЗТП сприяли широкому впровадженню його у виробництво при виготовленні нероз’ємних вузлів і конструкцій у різних галузях. У суднобудуванні його застосовують для отримання великогабаритних панелей з окремих екструдованих або пресованих профілів, які використовуються при спорудженні бортових секцій корпусів кораблів, поромів, катерів і шлюпок, стінок рефрижераторів і кают, палубних надбудов, платформ для гвинтокрилів, трапів, щогл, нафтодобувних платформ тощо. При виготовленні залізничного транспорту цей процес використовують для з’єднання профілів і жорстких інтегрованих панелей з різних алюмінієвих сплавів. В автомобільній промисловості ЗТП успішно застосовується при виготовленні капота і дверей автомобілів, просторових рам мотоциклів і велосипедів, кузовів і піднімальних пристроїв вантажівок, корпусів і підлоги автобусів, фургонів, причепів, елементів шасі, дисків коліс тощо. У будівництві з його допомогою зварюють панелі стін і фасадів, віконних і дверних рам, перекриттів та інших фрагментів споруд. Важливе місце займає цей процес при будівництві мостів, дозволивши зменшити їх масу та скоротити тривалість монтажних робіт. В аерокосмічній галузі ЗТП використовується для виготовлення елементів літаків і паливних баків ракет. У більшості випадків при конструюванні різноманітних вузлів таких виробів стараються використовувати стикові зварні з’єднання. Але зробити це не завжди вдається, а тому доводиться застосовувати напускові, кутові або таврові з’єднання. [14–16].

Мета даної роботи – дослідити структуру та оцінити міцність стикових, напускових і кутових з’єднань листів зі сплаву АМг6М, отриманих ЗТП.

Методика проведення досліджень. Для отримання стикових і напускових з’єднань використовували листи серійного алюмінієвого сплаву АМг6М (400×200×1,9 мм). При цьому було зварено чотири варіанти стикових з’єднань в залежності від орієнтації швів відносно напрямку вальцювання листів, розміщених зі сторони набігання (де напрямки обертання і лінійного переміщення інструмента співпадають) та відходу (де ці напрямки протилежні). Перший – коли обидва листи розташовували вздовж напрямку вальцювання (Д), а другий – коли обидва листи розташовували поперек напрямку вальцювання (П). Третій і четвертий

– коли зі сторони набігання розташовували лист вздовж напрямку вальцювання, а зі сторони відходу – поперек напрямку вальцювання і навпаки.

У залежності від розташування шва відносно напрямку вальцювання верхнього та нижнього листа також отримано чотири варіанти напускових з’єднань. Перший і другий – коли верхній та нижній листи розташовували вздовж або поперек напрямку їх вальцювання відносно орієнтації шва. А третій і четвертий – коли верхній та нижній лист мали різні напрямки вальцювання відносно орієнтації шва.

Кутові з’єднання отримували стиковими і напусково-стиковими швами, зварюючи між собою такі ж листи з листами товщиною 12,0 мм. У другому випадку на товстому листі робили вибірку шириною 6 мм (половина діаметра бурта) і глибиною 1,9 мм (товщина тоншого листа). При цьому товщі листи розміщували зі сторони набігання або зі сторони відходу.

У відповідності з вимогами до зварних з’єднань конструкцій відповідального призначення проводили стандартне хімічне травлення листів у розчині NaOH з наступним освітленням у розчині HNO₃, а безпосередньо перед зварюванням – механічну зачистку поверхонь листів у зоні формування швів.

ЗТП здійснювали на розробленій в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона лабораторній установці зі швидкістю зварювання $V_{зв} = 10$ м/год. при частоті обертання інструмента $N = 1420$ об/хв, використовуючи спеціальний інструмент з діаметром бурта 12 мм і наконечником у вигляді зрізаного конуса діаметром при основі бурта 3,4 мм і кутом нахилу утворюючого конуса 12° [37]. При зварюванні стикових і кутових з’єднань стиковими швами довжина наконечника становила 1,75 мм, а при зварюванні напускових і кутових з’єднань напусково-стиковими швами – 2,25 мм, щоб забезпечити надійне з’єднання верхнього листа з нижнім.

З отриманих зварних з’єднань виготовляли шліфи для дослідження їх структурних особливостей. Границю міцності стикових і кутових з’єднань визначали при статичному одноосному розтягуванні стандартних плоских зразків з шириною робочої частини 15 мм на універсальному сервогідралічному комплексі MTS 318.25. Оцінку структурних особливостей зварних з’єднань здійснювали за допомогою оптичного електронного мікроскопа ММТ-1600В.

Результати та обговорення. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що при ЗТП стикових і напускових з’єднань, незалежно від орієнтації шва відносно напрямку вальцювання листів, характер формування, зовнішній вигляд і макроструктура таких з’єднань залишаються однаковими (рис. 1, 2). Тобто, при ЗТП металургійна спадковість не впливає на структуру таких тонколистових з’єднань алюмінієвого сплаву АМг6М.

Мікроструктурні дослідження показали, що в центральній частині швів стикових з'єднань у результаті інтенсивної пластичної деформації ме-

талу формується ядро шва з дрібнокристалічною структурою. Розмір зерен, які мають практично глобулярну форму, не перевищує 4...5 мкм, а дис-

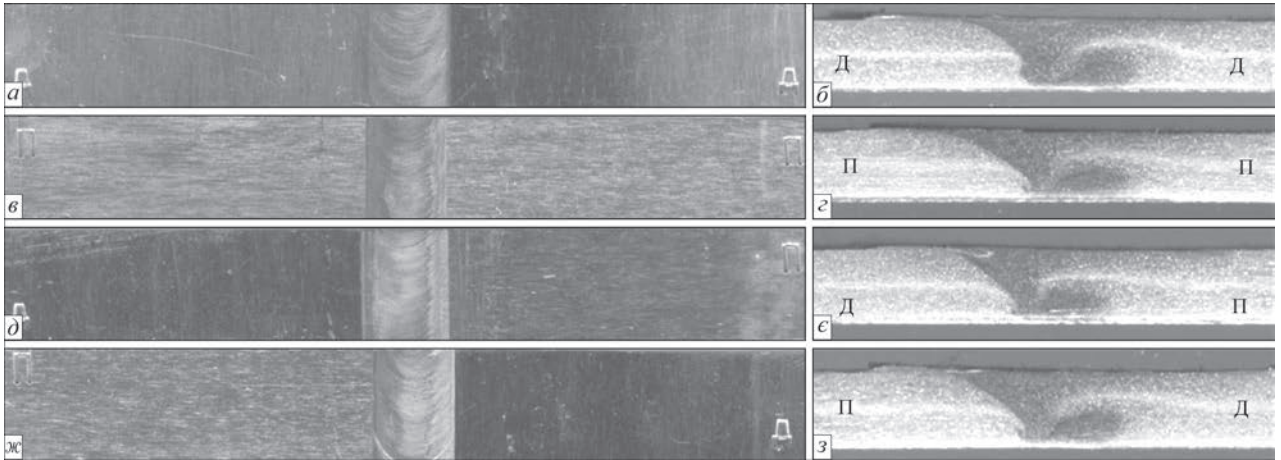


Рис. 1. Зовнішній вигляд поверхонь (а, в, д, ж) та поперечних перерізів (б, г, е, з) стикових з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6М завтовшки 1,9 мм, отриманих ЗТП при різній орієнтації швів відносно напрямку вальцювання листів (розташування листів: Д – вздовж вальцювання, П – поперек вальцювання)

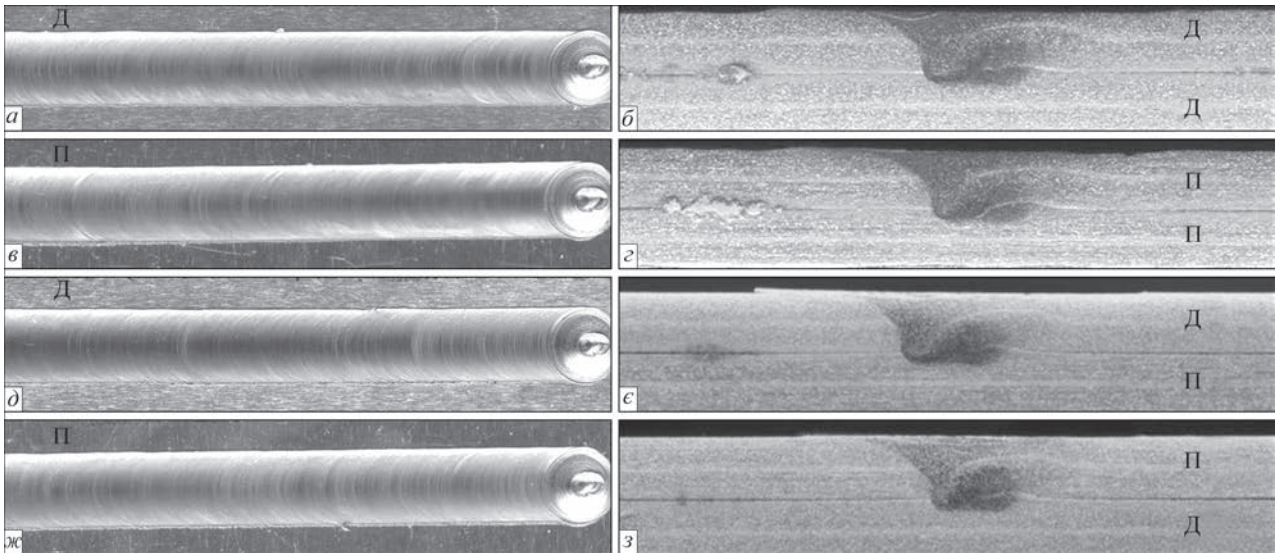


Рис. 2. Зовнішній вигляд поверхонь (а, в, д, ж) та поперечних перерізів (б, г, е, з) напускних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6М завтовшки 1,9 мм, отриманих ЗТП при різній орієнтації швів відносно напрямку вальцювання листів (розташування листів: Д – вздовж вальцювання, П – поперек вальцювання)

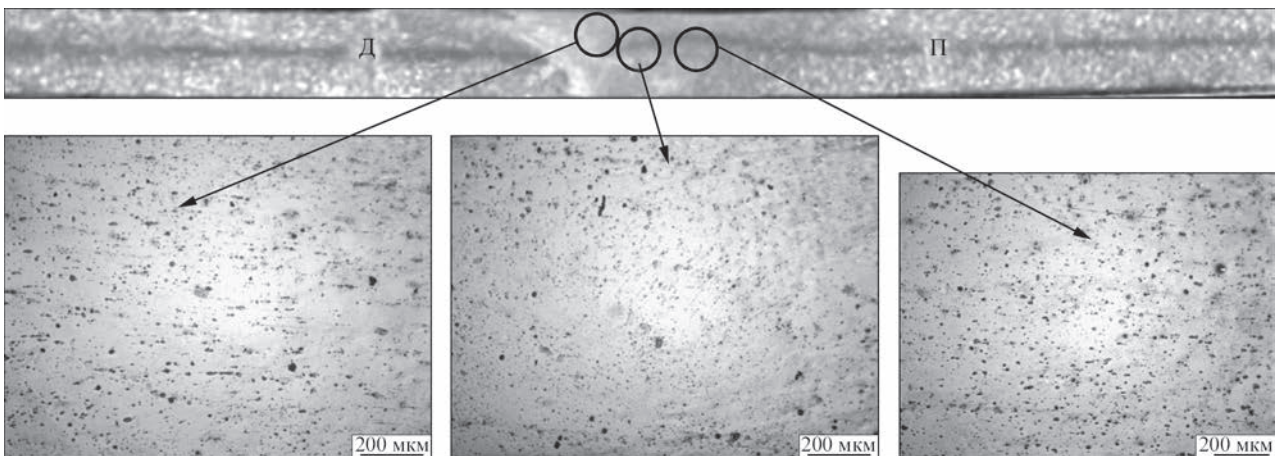


Рис. 3. Мікроструктура характерних ділянок стикового з'єднання сплаву АМг6М завтовшки 1,9 мм, отриманого ЗТП при розташуванні листа зліва (зі сторони набігання) вздовж напрямку його вальцювання, та справа (зі сторони відходу) – поперек напрямку його вальцювання (розташування листів: Д – вздовж вальцювання, П – поперек вальцювання)

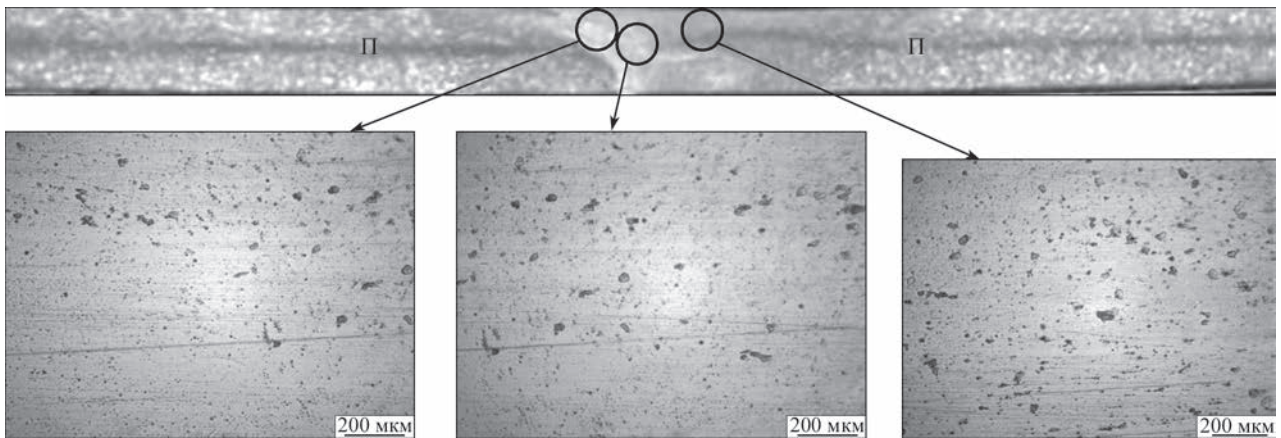


Рис. 4. Мікроструктура характерних ділянок стикового з'єднання сплаву АМг6М товщиною 1,9 мм, отриманого ЗТП при розташуванні обох листів поперек напрямку їх вальцювання (розташування листів: Д – вздовж вальцювання, П – поперек вальцювання)

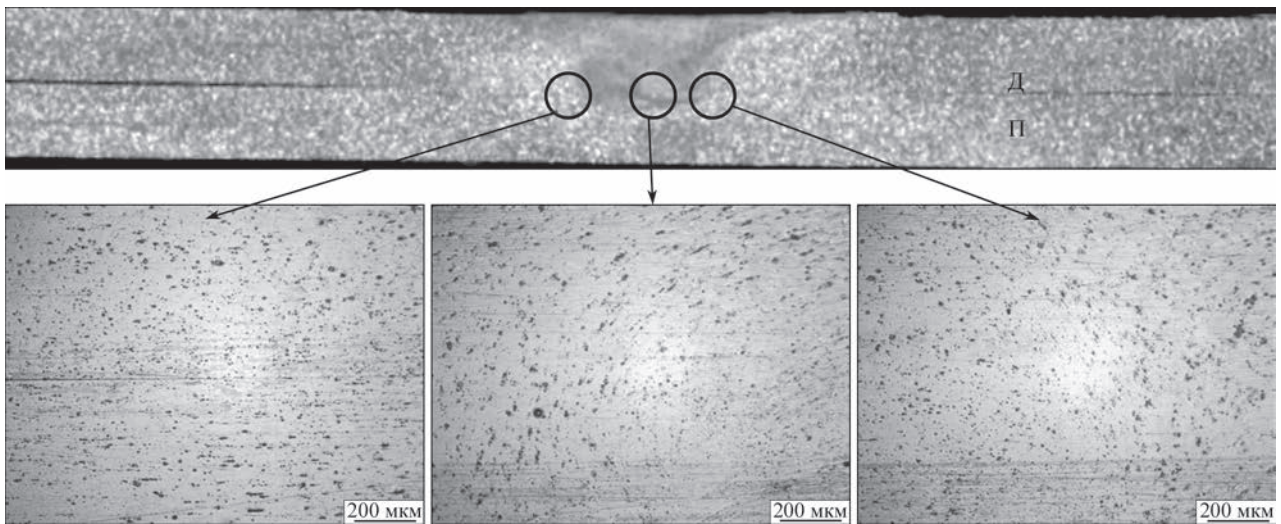


Рис. 5. Мікроструктура характерних ділянок напускного з'єднання сплаву АМг6М завтовшки 1,9 мм, отриманого ЗТП при орієнтації шва на верхньому листі вздовж, а на нижньому листі поперек напрямку їх вальцювання (розташування листів: Д – вздовж вальцювання, П – поперек вальцювання)

перших фазових виділень – ≤ 1 мкм. У зоні термомеханічного впливу на межі спряження шва з основним матеріалом відбувається часткова деформація металу, тому крім дрібних зерен утворюються дещо більші (6...7 мкм) видовжені зерна, орієнтовані вздовж напрямку переміщення пластифікованого металу робочими поверхнями інструмента. Завдяки формуванню швів у твердій фазі при ЗТП, на відміну від зварювання плавленням, немає умов для утворення одного з характерних для зварних з'єднань алюмінієвих сплавів дефекту – концентрації легкоплавких евтектичних включень на межі шва з основним матеріалом (рис. 3, 4). Аналіз мікроструктури напускних з'єднань теж показав, що в ядрі шва утворюється нова дрібнозерниста структура, яка не залежить від особливостей початкової структури металу, з якої вона сформувалася. А в зонах спряження шва з основним матеріалом відбувається деформування зерен у результаті термомеханічного впливу (рис. 5, 6).

На рис. 7, 8 представлено мікроструктуру характерних ділянок зварних з'єднань, отриманих

при ЗТП кутових з'єднань стиковими і напусково-стиковими швами. Аналіз мікроструктури кутових з'єднань, отриманих стиковими швами, показав, що як і при зварюванні тонколистових стикових з'єднань, у центральній частині швів внаслідок інтенсивної пластичної деформації металу формується ядро шва з дрібнокристалічною структурою. Розмір зерен, які мають практично глобулярну форму, не перевищує 4...5 мкм, а дисперсних фазових виділень – ≤ 1 мкм. У зоні термомеханічного впливу на межі спряження шва з основним матеріалом, як зі сторони тонкого (1,9 мм), так і зі сторони товстого (12,0 мм) листів, крім дрібних зерен утворюються дещо більші (6...7 мкм) видовжені зерна, орієнтовані вздовж напрямку переміщення пластифікованого металу робочими поверхнями інструмента. При цьому в зоні термічного впливу, де метал не зазнавав деформаційного впливу, максимальний розмір його зерен знаходиться на рівні 10...15 мкм. При зварюванні кутових з'єднань напусково-стиковими швами істотних відмінностей в мікрострукту-

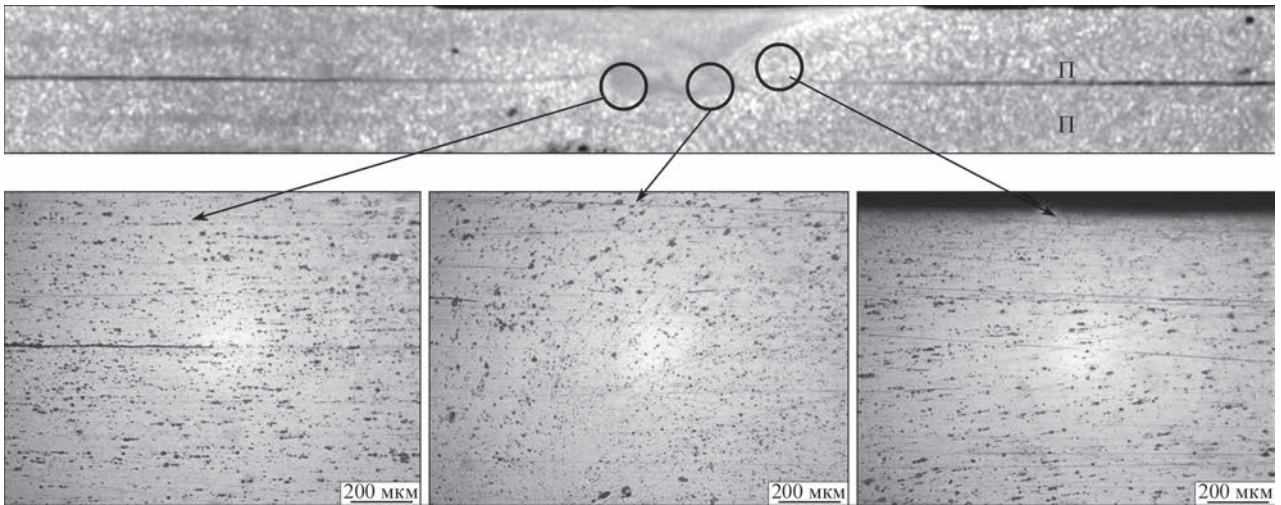


Рис. 6. Мікроструктура характерних ділянок напускного з'єднання сплаву АМг6М завтовшки 1,9 мм, отриманого ЗТП при орієнтації шва на верхньому та нижньому листах поперек напрямку їх вальцювання (розташування листів: Д – вздовж вальцювання, П – поперек вальцювання)

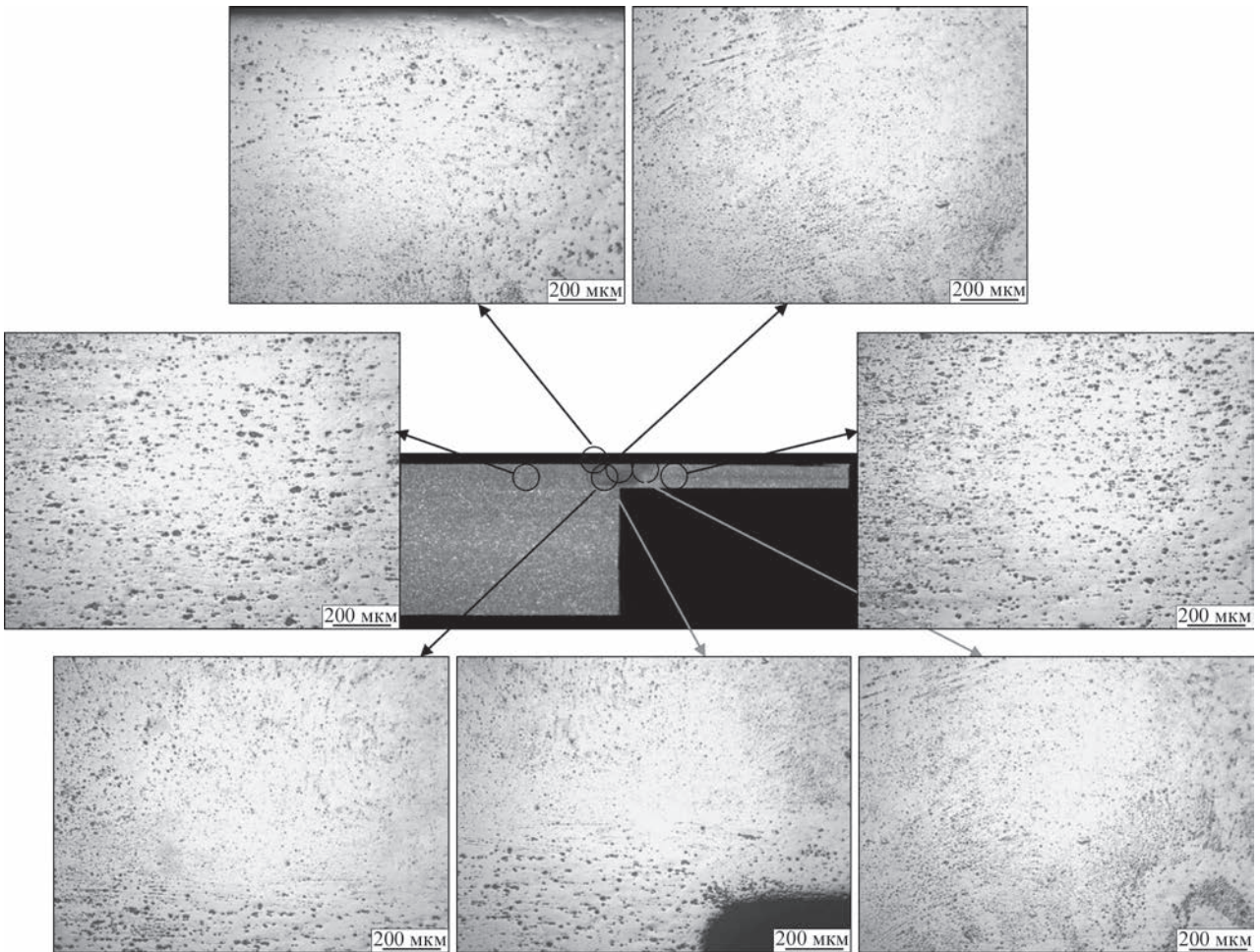


Рис. 7. Мікроструктура характерних ділянок кутового з'єднання сплаву АМг6М, отриманого ЗТП стиковим швом при розташуванні листа завтовшки 12,0 мм зі сторони набігання

рі характерних їх ділянок не спостерігається (див. рис. 8).

Для досліджуваного сплаву АМг6М межа міцності основного металу для зразків, вирізаних вздовж напрямку вальцювання листів, знаходиться на рівні 370 МПа, а поперек нього – на рівні 359 МПа. У результаті проведених досліджень

встановлено, що межа міцності зразків стикових з'єднань, у яких зі сторони набігання і зі сторони відходу напрямку вальцювання листів перпендикулярний відносно орієнтації шва, знаходиться на рівні 343...350 МПа. При статичному розтягуванні таких зразків їх руйнування відбувається по основному матеріалу зі сторони набігання чи

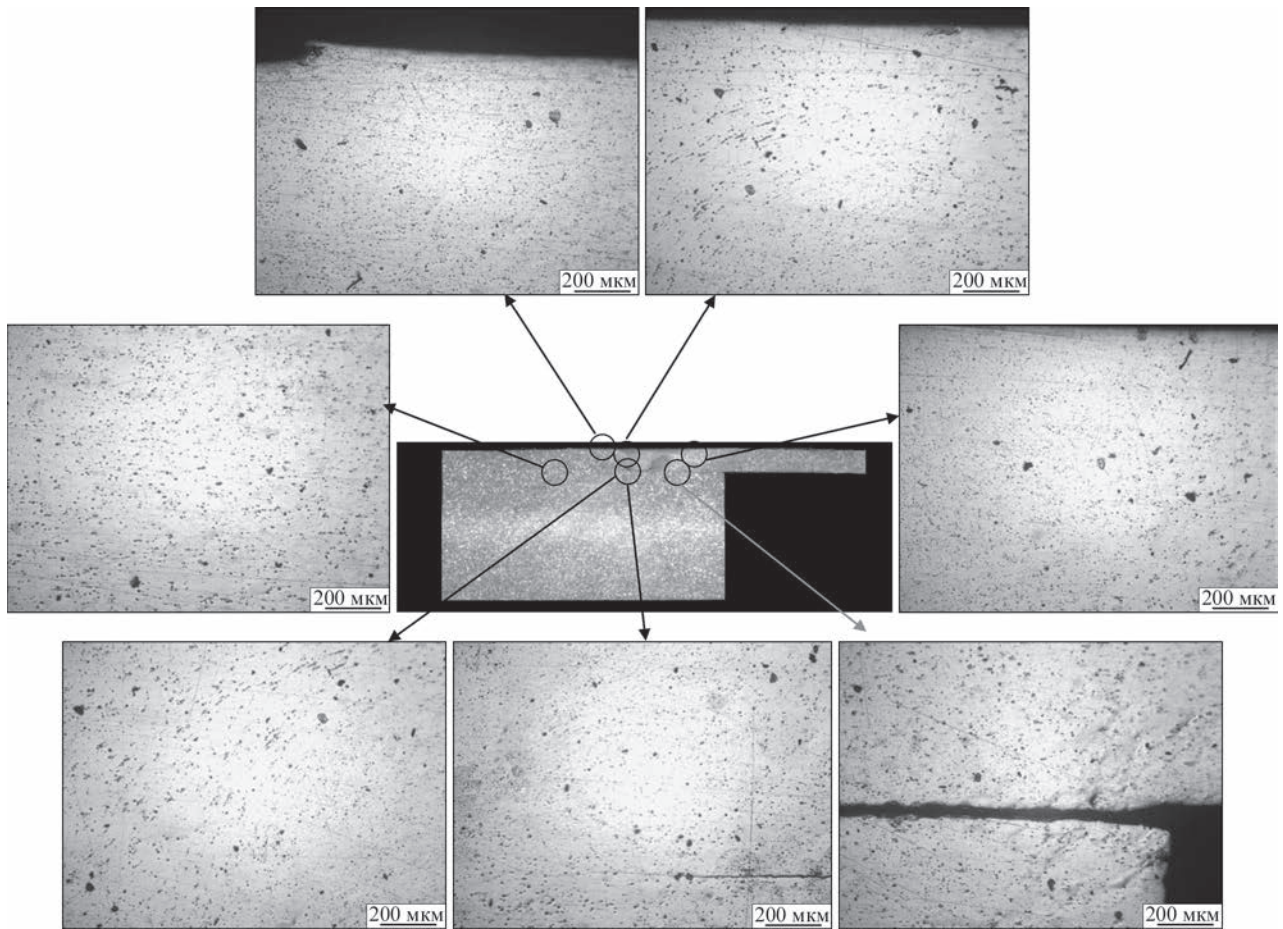


Рис. 8. Мікроструктура характерних ділянок кутового з'єднання сплаву АМг6М, отриманого ЗТП напусково-стиківим швом при розташуванні листа завтовшки 12,0 мм зі сторони набігання

відходу або на межі зон термомеханічного і термічного впливу зі сторони відходу (рис. 9, *a–в*).

При випробуванні зразків стикових з'єднань, у яких зі сторони набігання напрямок вальцю-

вання листів перпендикулярний, а зі сторони відходу – паралельний відносно орієнтації шва, межа міцності дещо нижча і знаходиться на рівні 336...343 МПа. Це обумовлено тим, що руйнуван-

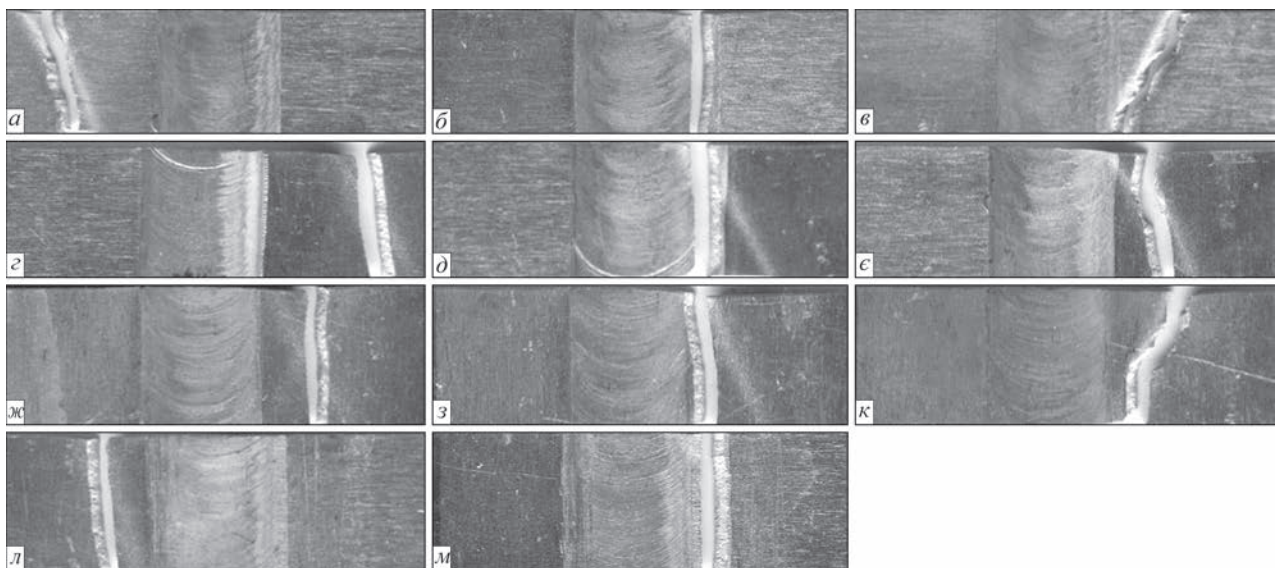


Рис. 9. Зовнішній вигляд лицьової поверхні зруйнованих зразків стикових з'єднань сплаву АМг6М завтовшки 1,9 мм, отриманих ЗТП при різному розташуванні листів відносно орієнтації шва: *a–в* – зі сторони набігання та зі сторони відходу напрямок їх вальцювання перпендикулярний відносно орієнтації шва; *г–е* – зі сторони набігання напрямок їх вальцювання перпендикулярний, а зі сторони відходу паралельний відносно орієнтації шва; *ж–к* – зі сторони набігання і зі сторони відходу напрямок їх вальцювання паралельний відносно орієнтації шва; *л, м* – зі сторони набігання напрямок їх вальцювання паралельний, а зі сторони відходу перпендикулярний відносно орієнтації шва

Межа міцності основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6, отриманих ЗТП

| Орієнтація зразків відносно напрямку вальцювання листів | | Межа міцності, МПа |
|---|--|--------------------|
| Основний метал | Вздовж напрямку вальцювання листів | 368...372 |
| | Поперек напрямку вальцювання листів | 357...361 |
| Стикове зварне з'єднання | Зі сторони набігання і зі сторони відходу інструменту напрямком вальцювання листів перпендикулярний відносно орієнтації шва | 343...350 |
| | Зі сторони набігання напрямком вальцювання листів перпендикулярний, а зі сторони відходу – паралельний відносно орієнтації шва | 336...343 |
| | Зі сторони набігання і зі сторони відходу напрямком вальцювання листів паралельний відносно орієнтації шва | 335...340 |
| | Зі сторони набігання напрямком вальцювання листів паралельний, а зі сторони відходу перпендикулярний відносно орієнтації шва | 338...344 |
| Кутове зварне з'єднання | Зі сторони набігання і зі сторони відходу інструменту напрямком вальцювання листів перпендикулярний відносно орієнтації шва | 342...347 |
| Напускове зварне з'єднання | Зі сторони набігання і зі сторони відходу інструменту напрямком вальцювання листів перпендикулярний відносно орієнтації шва | 337...341 |

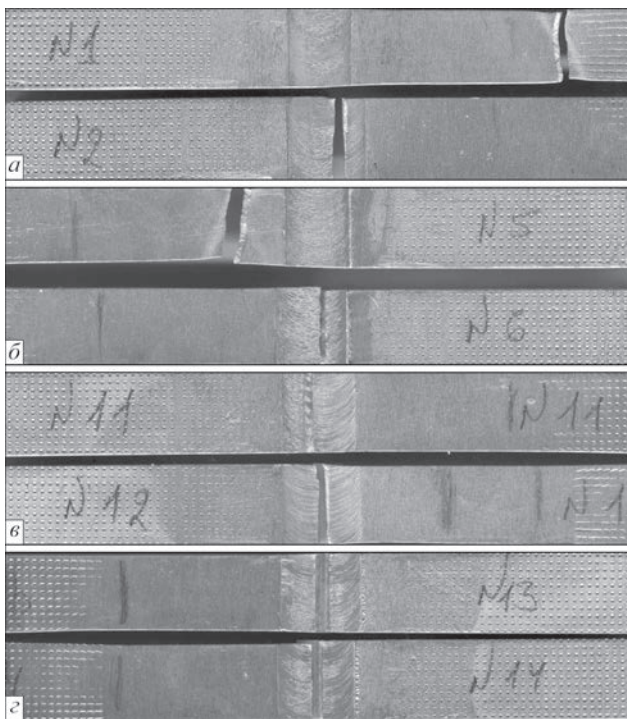


Рис. 10. Зовнішній вигляд лицьової поверхні зруйнованих зразків кутових з'єднань сплаву АМг6М, отриманих стиковими (а, б) та напусково-стиковими (в, г) швами при розташуванні листів завтовшки 12,0 мм зі сторони набігання (а, в) та відходу (б, г)

ня зразків відбувається по основному металу або на межі зон термомеханічного і термічного впливу зі сторони відходу, де зусилля при їх розтягуванні спрямовані перпендикулярно до напрямку вальцювання листів, і основний метал за таких умов має нижчу міцність (рис. 9, з-е).

Для стикових з'єднань, у яких зі сторони набігання та зі сторони відходу напрямком вальцювання листів паралельний відносно орієнтації шва, границя міцності становить 335...340 МПа. Цей показник близький за значеннями до попереднього варіанту розташування листів, оскільки руйнування зразків відбувається у тих же зонах, а міцність основного металу при такому розташуванні листів нижча (рис. 9, ж-к).

Якщо ж зі сторони набігання напрямком вальцювання листів паралельний, а зі сторони відходу перпендикулярний відносно орієнтації шва, то межа міцності зразків таких з'єднань знаходиться на рівні 338...344 МПа. Руйнування зразків при їх статичному розтягуванні відбувається по основному матеріалу зі сторони набігання, де зусилля спрямовані перпендикулярно до напрямку вальцювання листів, або на межі зон термомеханічного і термічного впливу зі сторони відходу (рис. 9, л, м).

Випробування зразків кутових з'єднань, отриманих стиковими швами, показали, що при статичному розтягуванні їх руйнування відбувається, як правило, по основному металу (інколи в зоні термомеханічного впливу в зоні спряження шва з основним металом) незалежно від місця розташування зварюваних листів (рис. 10, а, б). При цьому межа міцності таких зварних з'єднань знаходиться в діапазоні 342...347 МПа.

Зварні кутові з'єднання, отримані напусково-стиковими швами, при статичному розтягуванні руйнуються в зоні термомеханічного впливу в зоні з'єднання металу шва з основним металом (рис. 10, в, г) і мають межу міцності на рівні 337...341 МПа.

Узагальнені результати експериментальних даних дослідження міцності основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6, отриманих ЗТП, у залежності від орієнтації напрямку вальцювання листів, приведені в таблиці.

Висновки

1. При ЗТП стикових, напускових і кутових з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6М у центральній частині швів внаслідок інтенсивної пластичної деформації металу формується ядро шва з дрібнокристалічною структурою. Розмір зерен, які мають практично глобулярну форму, не перевищує 4...5 мкм, а дисперсних фазових виділень – ≤ 1 мкм. У зоні термомеханічного впливу на межі з'єднання шва з основним матеріалом відбуваєть-

ся часткова деформація металу, тому крім дрібних зерен утворюються дещо більші (6...7 мкм) видовжені зерна, орієнтовані вздовж напрямку переміщення пластифікованого металу робочими поверхнями інструмента. При цьому в зоні термічного впливу, де метал не зазнавав деформаційного впливу, максимальний розмір його зерен знаходиться на рівні 10...15 мкм.

2. Межа міцності зразків стикових з'єднань і кутових з'єднань, отриманих стиковими та напусково-стиковими швами, при їх статичному розтягуванні знаходиться на рівні 335...350 МПа і практично не залежить від розташування зварюваних листів зі сторони набігання чи сторони відходу та орієнтації швів відносно напрямку їх вальцювання. При цьому руйнування зразків стикових з'єднань відбувається здебільшого по основному металу або на межі зон термомеханічного і термічного впливу. Зразки кутових з'єднань, отримані напусково-стиковими швами, руйнуються у зоні термомеханічного впливу, а отримані стиковими швами, – ще й по основному металу.

Список літератури/References

1. Ищенко А.Я., Лабур Т.М., Бернадский В.М. и др. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях*. Киев, Экотехнология.
2. Poklyatsky, A.G., Grinyuk, A.A. (2001) Effect of parameters of asymmetric and modulated currents on quality of aluminium alloy welded joints. *The Paton Welding J.*, 7, 33–36.
3. Poklyatsky, A.G., Ishchenko, A.Ya., Grinyuk, A.A. et al. (2002) Non-consumable electrode argon-arc welding of aluminium alloys with arc oscillations. *Ibid.*, 2, 18–22.
4. Shiganov, I.N., Shakhov, S.V., Kholopov, A.A. (2012). Laser welding of aluminum alloys for aviation. *Engineering Journal: Science and Innovations*, 6, 34–50.
5. Defalco, J. (2006) Friction Stir Welding vs. Fusion Welding. *Welding J.*, 3, 42–44.
6. Pietras, A., Zadroga, L., Lomozik, M. (2004) Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW). *Welding International*, 1, 5–10.
7. Ishchenko, A.Ya., Podielnikov, S.V., Poklyatsky, A.G. (2007) Friction stir welding of aluminium alloys (Review). *The Paton Welding J.*, 11, 25–30.
8. Chionopoulos, S.K., Sarafoglou, CH.I., Pantelis, D.I. et al. (2008) Effect of Tool Pin and Welding Parameters on Friction Welded (FSW) Marine Aluminium Alloys. *Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), 1–3 October 2008, Chalkidiki, Greece*, 7–15.
9. Shibayanagi, T. (2007) Microstructural aspects in friction stir welding. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 9, 416–423.
10. Markashova, L.I., Poklyatsky, A.G., Kushnaryova, O.S. (2013) Influence of welding processes on the structure and mechanical properties of welded joints of aluminium alloy 1460. *The Paton Welding J.*, 3, 18–23.
11. Saad, A.K., Shibayanagi, T. (2007) Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Similar and Dissimilar Joints of Al and Mg Alloys. *Transaction of JWRT*, 1, 27–40.
12. Lin, H., Fujii, H., Maeda, M. et al. (2003) Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050-H24 aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 6, 450–454.
13. Mori, H., Noda, M., Tominaga, T. (2007) Current state on application of friction stir welding for rolling stock. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 11, 506–510.
14. Kumagai, M., Tanaka, S. (2001) Application of Friction Stir Welding to Welded Construction of Aluminium Alloys. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 1, 22–28.
15. Arbegast, W.J. (2006) Friction Stir Welding After a Decade of Development. *Welding J.*, 3, 28–35.
16. Ding, J., Carter, R., Lawless, K. et al. (2006) Friction Stir Welding Flies High at NASA. *Ibid.*, 3, 54–59.

STRENGTH AND STRUCTURE OF BUTT, OVERLAP AND FILLET JOINTS OF AMg6M ALLOY PRODUCED BY FRICTION STIR WELDING

A.G. Poklyatskyi, S.I. Motrunich, V.E. Fedorchuk, I.M. Klochkov

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

E-mail: pag556a@gmail.com.

The paper deals with the results of studying the structure and strength of butt, overlap and fillet joints of AMg6M aluminium alloy, produced by friction stir welding (FSW). It is shown that a weld nugget with fine-crystalline structure forms as a result of intensive plastic deformation. The size of grains, which are of practically globular shape, does not exceed 4...5 ~m, and that of dispersed phase precipitates – ≤ 1 ~m. In the zone of thermomechanical impact, in addition to fine grains, somewhat larger elongated grains (6...7 мкм) form, which are oriented along the direction of plasticized metal displacement by the tool working surfaces. Here, in the heat-affected zone, where the metal did not undergo any deformational impact, the maximum size of its grains is on the level of 10...15 ~m. The strength limit of samples of butt joints and fillet joints, produced by making butt and overlap-butt welds, is on the level of 335 – 350 МПа at their static tension, and it practically does not depend on the welded sheet location either from the advancing side or from the retreating side, or on the weld orientation relative to their flanging direction. Here, the butt joint samples fail mainly through the base metal or the boundary of zones of thermomechanical and thermal impact. Samples of fillet joints produced by overlap-butt welds, fail in the zone of weld-to-base metal transition in the thermomechanical impact zone, and those produced by butt welds fail also through the base metal. 16 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: friction stir welding, AMg6M aluminium alloy, fillet joints, strength, butt joints, overlap joints

Надійшла до редакції 14.02.2023



Міжнародна спеціалізована виставка

**Енергозберігаюче обладнання та альтернативні джерела енергії
«ISTWE»**

21–22 вересня 2023 р.

Національний комплекс «Експоцентр України» - ВДНГ

<https://vdlg.ua>

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ РЕБІНДЕРА

М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, М.О. Ковальчук, Л.С. Паршутіна, О.М. Чукашкін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: 4chewip@gmail.com

Шви полімерних матеріалів, зварені нагрітим інструментом встик, відзначаються різноманітністю структурних складових. Дослідження таких швів дозволяє вивчати загальні фундаментальні процеси структуроутворення при формуванні зварних з'єднань полімерів. У даній роботі було проведено механічні випробування зварних з'єднань полімерних труб з локальним навантаженням у середовищі поверхнево активних речовин та використанням ефекту Ребіндера. Експериментальні зразки з'єднань труб діаметром 63, 90, 110 та 160 мм із поліетилену марки ПЕ80 виконували на стандартному обладнанні для зварювання нагрітим інструментом встик, на режимах, рекомендованих ДБН В.2.5-41: 2009. Випробування проводили згідно вимогам, міжнародного стандарту ISO 22088 «Розтріскування під дією зовнішнього середовища» (ESC). Досліджено характерні особливості розповсюдження тріщин при випробуваннях основного матеріалу та зони сплавлення зварного шва. З використанням оптичної мікроскопії досліджено поверхні руйнування зразків безпосередньо після випробувань та після хімічного травлення у розчині сірчаної кислоти. Показано, що в зоні сплавлення утворюється ослаблена «розмита» структура полімерного матеріалу, яка руйнується при локальному навантаженні. Бібліогр. 14, рис. 10.

Ключові слова: зварювання нагрітим інструментом встик, надмолекулярна структура, механічні випробування, поверхні руйнування

Вступ. Надмолекулярна будова полімеру дуже складна та розділяється на декілька рівнів в залежності від розмірів структурних елементів. Для кристалічних полімерів основною складовою одиницею є сфероліти, розміри яких мають величину на рівні 10 мкм. На наступному рівні розташовуються домени кристалітів-ламель, що мають розміри 10...100 нм. Розміри складчастих ламелей оцінюються у 10 нм. Елементарна складчаста ланка, яка утворює ламелі має розміри у межах 0,1...1,0 нм.

Більшість конструкційних пластмас мають в складі різноманітні домішки та наповнювачі, тому спостерігати мікроструктуру матеріалу за допомогою оптичного мікроскопа зазвичай неможливо [1]. Наочно оцінити деталі складної надмолекулярної будови полімерного зварного з'єднання можна досліджуючи характерні особливості руйнування зварного шва під дією локальних механічних навантажень [2, 3].

Оскільки полімери складаються з довгих гнучких молекулярних ланцюгів, вони мають характерні особливості матеріалу у твердому стані: неоднорідність, нелінійність та часову залежність механічних властивостей [4]. Втрата міцності полімером зазвичай відбувається в декілька етапів після досить значних пластичних деформацій. У теорії руйнування полімерів використовують терміни «послаблення» (failure), тобто накоплення дефектів структури, «руйнування» (fracture) – формування тріщин з утворенням нових поверхонь та розрив (rupture) – розділення тіла на

окремі частини. Тобто поступова втрата міцності полімерним матеріалом при навантаженні відбувається за рахунок розширення існуючих та утворення нових дефектів надмолекулярної структури. Дослідження розповсюдження тріщин використовується для визначення різних видів міцності полімерних матеріалів [5]. У даній роботі проводили дослідження міцності основного матеріалу та зварних з'єднань полімерів механічним навантаженням із додатковим стимулюванням руйнування за допомогою поверхнево активних речовин (ПАР).

Процеси руйнування, що відбуваються у твердому полімері, суттєво залежать від його фізико-хімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Такі органічні речовини, як спирти, жирні кислоти, каніфолі, мила містять у складі молекул одночасно гідрофільні та гідрофобні групи та називаються поверхнево активними. Молекули ПАР при контакті інтенсивно адсорбуються на поверхні твердого тіла, що суттєво зменшує його поверхневу енергію, та пропорційно зменшують міцність тіла [6, 7].

Адсорбційне зниження міцності твердих тіл отримало назву ефект Ребіндера [8]. Ефект має універсальний характер та спостерігається для будь-яких твердих матеріалів.

У полімерах розвиток тріщини у матеріалі відбувається через послідовний розрив окремих макромолекулярних ланцюгів. З просуванням тріщини утворюються нові поверхні матеріалу, які адсорбують ПАР. Молекули ПАР, покриваючи

Кораб М.Г. – <http://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, Юрженко М.В. – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>,

Ковальчук М.О. – <https://orcid.org/0000-0003-2161-643X>

© М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, М.О. Ковальчук, Л.С. Паршутіна, О.М. Чукашкін, 2023

собою новоутворені площини тріщини нейтралізують їх високий енергетичний потенціал та намагаються просунутись якнайближче до самого початку тріщини. Навіть при відсутності зовнішніх навантажень ці молекули, стикаючись між собою створюють в основі тріщини руйнівне зусилля F (рис. 1), яке в мінімальних зазорах може досягати значної величини.

Використовуються різні методики створення локальних навантажень та концентраторів напружень у полімерному зразку. Міжнародний стандарт ISO 22088-1 [9] дає визначення процесу утворення тріщин в полімерному матеріалі (пластмасі), який знаходиться в певному хімічному середовищі та перебуває під дією постійного напруження, меншого за величину межі текучості. Цей процес має стандартну назву – «розтріскування під дією зовнішнього середовища» (environmental stress cracking, ESC).

Один із найбільш розповсюджених способів оцінки стійкості до ESC – метод вигнутої пластинки [10]. На пластину полімерного матеріалу наносять надріз, який слугує концентратором для ініціації тріщин, та згинають у цьому місці навпіл, створюючи постійне механічне напруження. Вигнуті пластинки розміщують у середовищі ПАР та через деякий час оцінюють кількість та розміри тріщин, що утворились. Однак, навантаження при цьому методі прикладається асиметрично та одразу по всій ширині пластини-зразка, тому цей метод застосовують для випробувань основного матеріалу, а для полімерних зварних з'єднань він непридатний. У даній роботі ставилась задача порівняльних випробувань міцності основного матеріалу та матеріалу зварних швів, а також оцінки надмолекулярної будови перехідної зони сплавлення у зварних з'єднаннях поліетиленових труб.

У роботі використовували відрізки стандартних поліетиленових труб діаметром 63, 90, 110 та 160 мм, призначених для будівництва газопроводів, виготовлених із поліетилену марки ПЕ80 згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-73-98. Використовували труби чорного та жовтого кольорів.

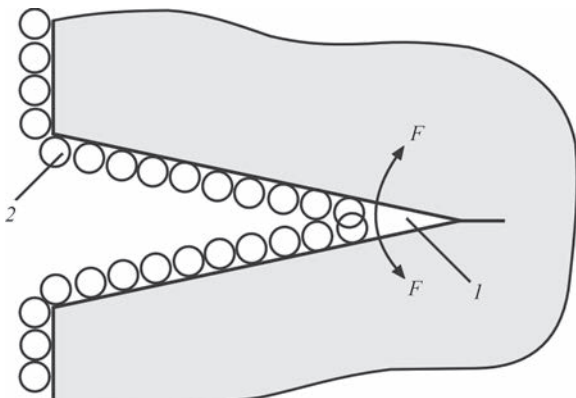


Рис. 1. Схема впливу ПАР на розвиток тріщини в твердому тілі: 1 – початок тріщини; 2 – молекули ПАР на поверхні

Відрізки поліетиленових труб з'єднували стиковими зварними швами на стандартному обладнанні для зварювання нагрітим інструментом встик, на режимах, рекомендованих нормативом [13].

Метод визначення стійкості до утворення тріщин. Стійкість основного матеріалу та матеріалу зварних швів до утворення тріщин визначали згідно з методикою ISO 22088-4 [11], шляхом утворення локального навантаження в потрібній області полімерного зразка. Для цього використовували метод вдавлення стрижня (pin impression method), сутність якого схематично показано на рис. 2. Зі зварного з'єднання вирізається пластинчастий зразок з розташуванням шва посередині. На лінії сплавлення свердлиться отвір діаметром 3...4 мм в залежності від розмірів зразка. В отвір вдавлюється циліндричний стрижень дещо більшого діаметру з конусним наконечником, що створює у зразку загальні зусилля розтягання F та тангенційні зусилля по периметру отвору f . В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) вже проводили роботи з використанням цього методу для порівняння міцності зварного стикового шва поліетиленових труб в різних точках орбіти стику [12].

В усіх випробуваннях за методикою ISO 22088-4 використовували стрижень з конусним наконечником, варіюючи співвідношенням діаметрів отвору та стрижня для змінення величини напруження у зразку (рис. 2). Після введення стрижня у отвір та виникнення локального навантаження зразка зі зварними швами поміщали у водний розчин ПАР (марка ОП-7) при температурі до 80 °С та витримували там від декількох хвилин до годин до появи тріщин. Для полегшення вивчення лінії сплавлення зварних швів виконували з'єднання з труби

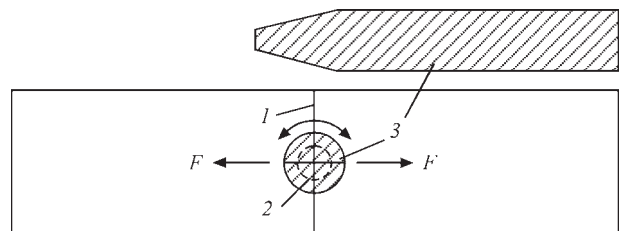


Рис. 2. Схема ініціації руйнування зварного з'єднання з використанням отвору та циліндричного стрижня: 1 – лінія сплавлення зварного шва; 2 – наскрізний отвір у зразку; 3 – циліндричний стрижень

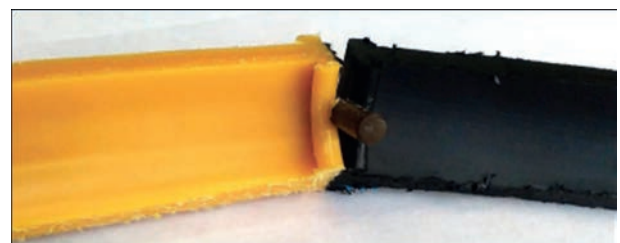


Рис. 3. Зразок стикового зварного з'єднання поліетиленових труб, зруйнований після випробувань

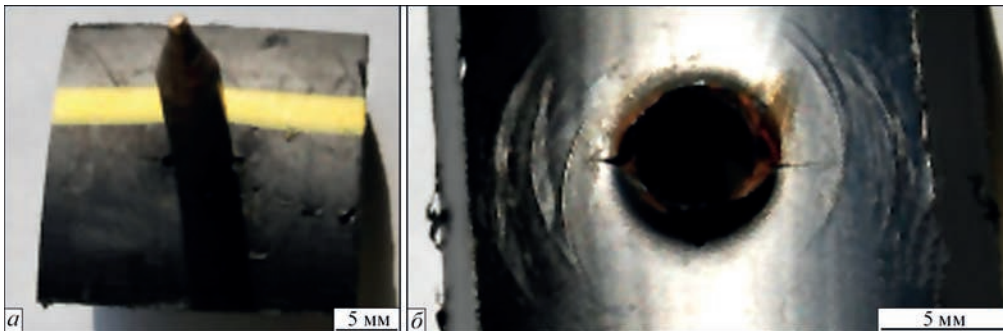


Рис. 4. Тріщини в зразках з основного матеріалу труб із поліетилену газових марок ПЕ80 товщиною стінки 10 мм на зовнішній (а) та внутрішній поверхні труби (б)

чорного та жовтого кольорів. У більшості випадків, при локальному ініціюванні напруження за допомогою стрижня, зварні з'єднання руйнувались поблизу лінії сплавлення (рис. 3). Різниця в кольорах труб дозволяє добре оцінити приналежність полімерного матеріалу до однієї чи іншої трубної деталі на поверхнях руйнування.

Знімки зразків зроблені цифровою камерою Nikon D350 (NIKON Corp, Токіо, Японія). Збільшенні зображення поверхонь зразків зроблені тією ж камерою, вбудованою в оптичний поляризаційний мікроскоп Versamet-2 (UNITRON, New-York, NY, USA).

Результати досліджень. Поліетилену трубних марок ПЕ80 та ПЕ100 є досить пластичними матеріалами з високою стійкістю до тріщин. Тому при випробуваннях основного матеріалу поліетиленових труб невеликі тріщини з'являються тільки після витримування під напруженням в середовищі ПАВ протягом декількох годин (рис. 4). Тріщини в основному матеріалі мають невелику довжину та розповсюджуються по обидві боки від джерела напруження вздовж прямої лінії. На зовнішній поверхні труби напрямок тріщин точно співпадає зі поздовжньою віссю труби, що свідчить про певну структурну організацію матеріалу. На внутрішній поверхні труби тріщини утворюються у поперечному відносно осі напрямку, вони не мають наскрізного характеру, а формуються на поверхнях зразків там, де напруження та вплив ПАВ найбільші.

Поверхні руйнування зразка труб із поліетилену ПЕ80 зовнішнім діаметром 110 мм та товщиною стінки 10 мм (рис. 5) демонструють повністю когезійну природу зварного з'єднання, тобто фрагменти матеріалу одного елемента з'єднання присутні на поверхні руйнування іншого. Зразок зварного з'єднання труб діаметром 160 мм, товщиною стінки 14,6 мм при випробуваннях руйнувався неоднорідно (рис. 6). Частина зразка руйнується точно вздовж поверхні сплавлення, інша частина демонструє спільний характер розповсюдження тріщини по шву та основному матеріалу труби. При значній товщині стінки труби напру-

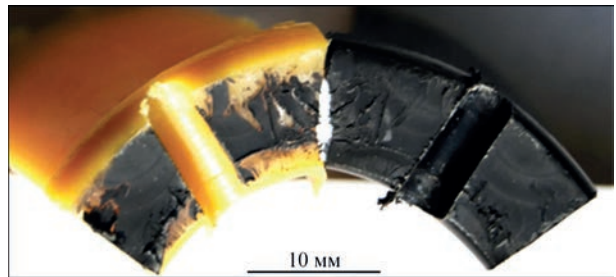


Рис. 5. Поверхні руйнування зварного з'єднання труб з ПЕ80 діаметром 110 мм та товщиною стінки 10 мм

мок розповсюдження тріщини може змінюватись та відходити від ослабленої зони сплавлення.

Аналізуючи збільшене зображення тріщини, що утворюється при руйнуванні зварного з'єднання (рис. 7), можна судити про характер перехідної структури, що утворилась після охолодження розплавленого матеріалу всередині шва. Суцільна сферолітна структура по лінії розмежування не спостерігається. Вочевидь моноліти двох деталей поєднуються через більш дрібні упорядковані структури типу фібріл, складчастих доменів або міцел. Отже, лінія з'єднання в перехідній структурі опиняється найслабшим місцем, при локальному навантаженні починається розтягування надмолекулярних структур (рис. 7, знизу), що утримують з'єднані елементи. В звичайних умовах повільно, а в середовищі ПАВ досить швидко, розтягну-

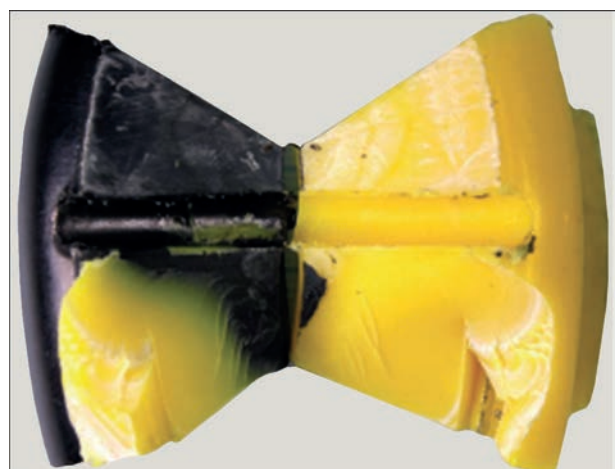


Рис. 6. Поверхні руйнування зварного з'єднання труб з ПЕ80 діаметром 160 мм та товщиною стінки 14,6 мм

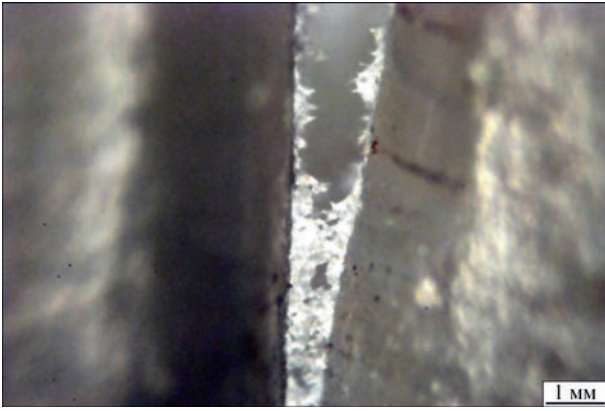


Рис. 7. Розвиток тріщини при руйнуванні зварного з'єднання поліетиленових труб, $\times 10$

ті структури досягають межі міцності та рвуться, сприяючи подальшому розповсюдженню тріщини. Якщо подібні ослаблені структури в зварному шві мають локальний характер, тріщина, руйнуючи їх, зупиняється або змінює напрямок, зустрівши міцніші структурні ділянки. В нашому випадку, перехідні структури рівномірно розподілені всією площею орбіти стику, тому й руйнування відбувається в цій площині, або її околицях. На поверхні руйнування спостерігаються тільки залишки розірваних перехідних структур (рис. 7, верхня частина).

Лінія сплавлення двох трубних зразків з поліетилену різних кольорів (рис. 8) демонструє часткове взаємопроникнення надмолекулярних доменів чорного та жовтого поліетиленів (на фото має білий колір). Профіль межі розподілу має нерівномірний зубчастий характер, вірогідно сформований під дією випадкових факторів. Такий профіль явно не може бути наслідком спільної течії розплавів двох деталей, що з'єднуються під дією зусилля осадження. У перехідній зоні видно гострі протяжні елементи матеріалу чорного та жовтого матеріалу, які взаємно проходять крізь лінію сплавлення, «розмиваючи» її. Логічно припустити, що чим глибше відбувається подібне взаємопроникнення матеріалів при формуванні шва, тим міцніше буде утворене зварне з'єднання. Єдина рушійна сила такого взаємопроникнення – це тепловий рух сегментів макромолекулярних ланцюгів при підвищеній температурі. Швидкість такого руху обмежена та різко падає зі зниженням температури. Тому для утворення міцного зварного з'єднання необхідно перебування матеріалу в зоні сплавлення деякий час при підвищеній температурі.

Інформацію про характер мікроструктури полімеру дозволяє отримати дослідження поверхонь їх руйнування. Руйнування будь якого матеріалу є утворенням нових поверхонь, у даному випадку руйнування зразків зварних з'єднань поліетиленових труб є процесом, що відбувається відносно повільного розповсюдження площини тріщини від місця її ініціації та зародження. У напівкристаліч-

ному матеріалі, яким є поліетилен високої густини, на надмолекулярному рівні межують ділянки упорядкованого та аморфного матеріалу. У аморфних ділянках й міжмолекулярних порожнинах також скупчуються різноманітні домішки та олігомери. Розповсюдження тріщини відбувається саме по ослабленим, аморфним ділянкам, тому дозволяє проявити структуру матеріалу.

Поверхні руйнування вивчали за допомогою оптичного мікроскопу на зразках чорного кольору, оскільки темний матеріал дозволяє отримати більш контрастне зображення. Типовий приклад направлених структурних утворень в масиві полімерного матеріалу приведено на рис. 9. На процес розповсюдження тріщини накладається низка об'єктивних та випадкових факторів. Тому ми спостерігаємо на поверхні руйнування видовжені криволінійні структури, які є проявом регулярної сферолітної структури і випадково розташованою ділянками, які утворились через «блукання» тріщини на ділянках з відносно ізотропною структурою.

Сферолітна структура кристалічного полімеру формується нерівномірно, в залежності від теплових умов на рівні мікронних розмірів та наявності необхідної кількості зародків кристалізації. При утворенні упорядкованих структур, низькомолеку-

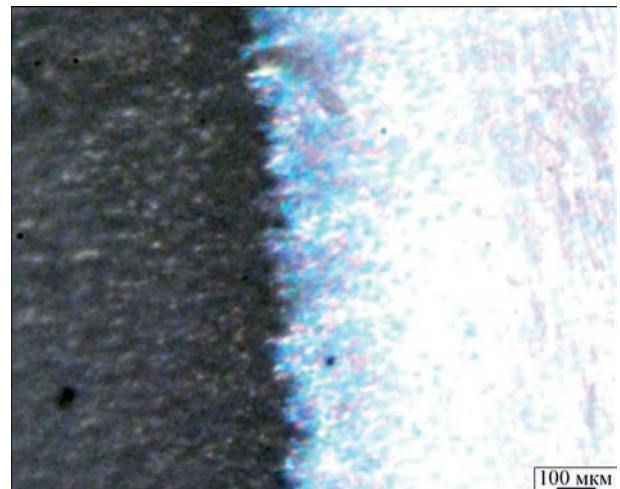


Рис. 8. Лінія зварного з'єднання поліетиленових труб різних кольорів при збільшенні $\times 20$

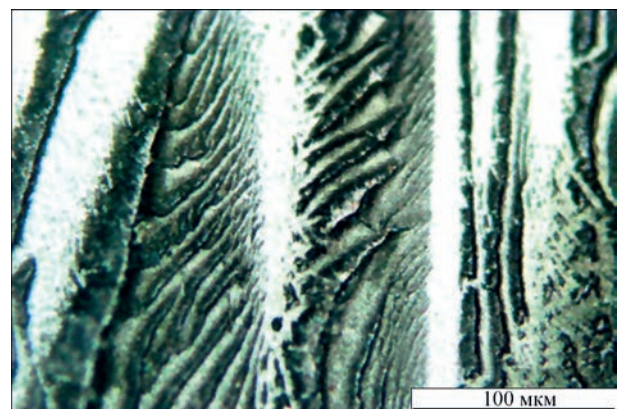


Рис. 9. Фрагмент поверхні руйнування зі збільшенням $\times 10$

лярні речовини витісняються в області між ними. Випадково сформовані сфероліти, в свою чергу, утворюють надкристалічні структури, які при руйнуванні формують поверхню, подібну до двоскатних ламелей, тільки значно більшого масштабу. На рис. 9 добре видно ці лінійні, двоскатні, або напівкруглі утворення з глибокими, загостреними донизу впадинами між ними. Слід мати на увазі, що така поверхня утворилась не в результаті якоїсь спеціальної обробки або травлення, а внаслідок вільного процесу руйнування матеріалу. Така поверхня свідчить про суттєву фізичну неоднорідність матеріалу, в якому упорядковано чергуються області міцного та ослабленого матеріалу.

Двоскатні упорядковані створення межують із більш протяжними видовженими лінійними областями на поверхні. Вочевидь, на цих ділянках матеріал на мікрорівні створював менший опір розповсюдженню тріщини і руйнування відбувалось прямолінійно, залишаючи на поверхні слід, як проведений «під лінійку». Спостерігаються, також, ділянки з разупорядкованою структурою поверхні, яким, вочевидь відповідають аналогічні ділянки структури в масиві матеріалу. Заглиблення у поверхні між двоскатними структурами насправді мають досить рівномірну однорідну структуру. Вочевидь, це є наслідком того, що ослаблені ділянки між кристалічними областями мають свій певний мінімальний розмір, який проявляється на поверхні у вигляді ниткоподібних утворень майже однакової ширини. Видно, що такий характер поверхні є тільки в деяких певних місцях, отже він проявляється тільки при збігу декількох необхідних факторів у процесі розповсюдженні тріщини.

Наочно виявити на поверхні полімеру кристалічні та аморфні ділянки допомагає травлення зразка у розчині сірчаної кислоти. Аморфні ослаблені ділянки розчиняються значно швидше за кристалічні, тому проявляються на поверхні у вигляді заглиблень на фоні більш високих упорядкованих ділянок. Поверхні руйнування зразків піддавали травленню та досліджували за допомогою оптичного мікроскопу (рис. 10).

Ділянки поверхні з лінійною упорядкованою структурою майже не зазнають змін після травлення. Вочевидь, це області з найбільшим ступенем кристалічності та відсоток аморфної фази тут невеликий. Тому після травлення на поверхні залишаються тільки вузькі поздовжні полоси, що утворились після видалення невеликої кількості ослабленого матеріалу. Зони сферолітної структури характеризуються суттєвою нерівномірністю поверхні та наявністю утворень округлої форми. Оскільки сфероліти кристалізуються нерівномірно, вони скупчуються в деяких місцях, утворюючи надкристалічні асоціації, що складаються з округлих об'єктів. Домішки, олігомери та інший аморфний матеріал в невеликій кількості залишаються в складі сферолітів, але в основній масі витісняються за межі упорядкованих зон, утворюючи, в свою чергу, аморфні асоціації, іноді досить великих розмірів.

На рис. 10, *a* видно, що структура поверхні неоднорідна та змінюється від однієї ділянки до іншої. Кристалічні ділянки неправильної форми, вочевидь є проявом асоціацій сферолітів, які зрослись в одне велике утворення. Не випадково, одна з найбільш реалістичних теорій будови полімерів, паракристалічна модель Хоземанна [14] описує його структуру як рухому матрицю з кристалічних складчастих утворень, які плавають в аморфній фазі, розташованій між ними. Окремі випуклі округлі об'єкти можуть бути залишками розірваних молекулярних доменів – фібрил, які утворились в процесі утворення тріщини. Аморфний матеріал займає в деяких областях досить великі площі, отже в цих зонах полімерний матеріал має знижену міцність, що може слугувати напрямком для розповсюдження тріщин. На фото найбільшого масштабу (рис. 10, *b*) видно упорядковані утворення круглої форми, які після травлення отримали характерну конусоподібну форму, всередині якої спостерігається більш дрібна пошарова структура, подібна до сферолітної. Хімічний травник видалив на цих об'єктах усі аморфні петлі ланцюгів та прохідні молекули, залишивши тільки кристалічну фазу сферичної форми.

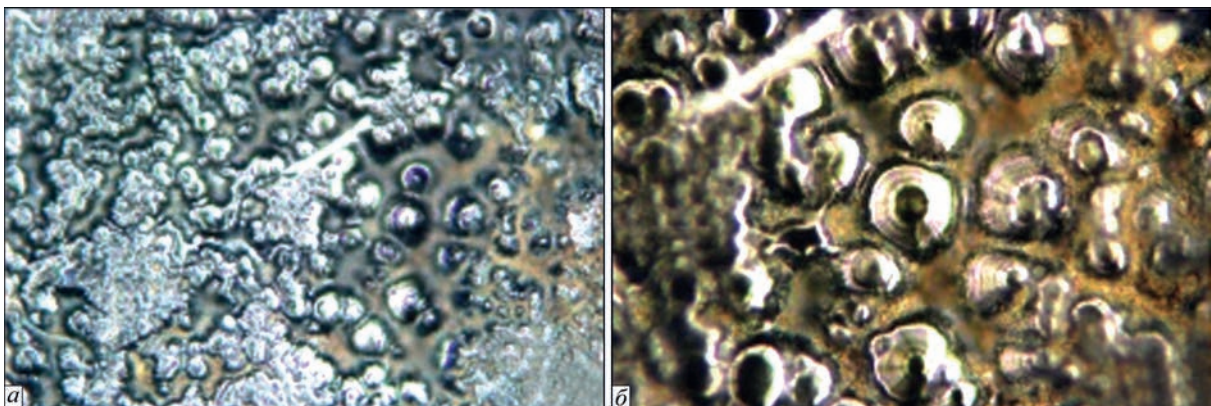


Рис. 10. Ділянка упорядкованих сферолітних структур, збільшення: *a* – $\times 10$; *b* – $\times 20$

Слід відзначити, що зварні з'єднання, що досліджувались є механічно рівномірними згідно з випробуваннями на розтяг згідно з [12]. Таким чином, хоча мікроструктура полімерного матеріалу досить нерівномірна, вздовж поверхні сплавлення формується ослаблена зона, але на макрорівні можна вважати матеріал зварного з'єднання статистично ізотропним. У зоні сплавлення стикового зварного шва формується напівкристалічна перехідна зона, що вочевидь складається із фрагментів макромолекул та кластерів, що тонким шаром з'єднують монолітну сферолітну структуру основного матеріалу.

Висновки

1. Проведено випробування на стійкість до тріщин основного матеріалу та зварних з'єднань поліетиленових труб згідно з вимогами міжнародного стандарту ISO 22088-4 з використанням ефекту Ребіндера.

2. Характер розповсюдження тріщин в основному матеріалі свідчить про певну структурну організацію поліетилену у поздовжньому напрямку труби. На зовнішній поверхні труби напрямок тріщин точно співпадає з її поздовжньою віссю. У зварних з'єднаннях поліетиленових труб тріщини утворюються вздовж поверхні сплавлення, або поблизу неї.

3. Характер руйнування показує, що суцільна сферолітна структура по лінії сплавлення не існує, а ослаблена «розмита» структура полімерного матеріалу утворюється в цій зоні взаємопроникненням фрагментів макромолекул. На збільшених зображеннях поверхні руйнування зварних з'єднань спостерігаються як неупорядковані випадково розташовані ділянки, так і фрагменти регулярної сферолітної структури, що свідчить про «блукання» тріщини в районі ослабленої зони сплавлення.

Список літератури/References

1. Патон Б.Є. (2018) *Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас*. Київ, Наукова думка.

INVESTIGATIONS OF THE STRUCTURE OF WELDED JOINTS OF POLYMERS USING THE REHBINDER EFFECT

M.G. Korab, M.V. Yurzhenko, M.O. Kovalchuk, L.S. Parshutina, O.M. Chukashkin

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

E-mail: 4chewip@gmail.com

Welds of polymeric materials, butt welded with a heated tool, are distinguished by a variety of structural components. Investigations of such welds allow studying the general fundamental processes of structure formation in the formation of welded joints of polymers. In this work, mechanical tests of welded joints of polymer pipes with a local load in the environment of surface active substances and with the use of the Rehbinder effect were carried out. Experimental specimens of pipe joints with a diameter of 63, 90, 110 and 160 mm from PE80 polyethylene were produced in the standard equipment for butt welding with a heated tool on the modes recommended by DBN B.2.5-41:2009. The tests were carried out in accordance with the requirements of the international standard ISO 22088 "Cracking under the influence of the environment" (ESC). The characteristic features of cracks propagation in the tests of the base material and the fusion zone of the weld were investigated. Using optical microscopy, the fracture surfaces of the specimens were investigated immediately after tests and after chemical etching in sulfuric acid solution. It was shown that in the fusion zone, a weakened "blurry" structure of polymeric material is formed, which is fractured during a local load. 14 Ref., 10 Fig.

Keywords: butt welding with a heated tool, supramolecular structure, mechanical tests, fracture surfaces

Надійшла до редакції 02.01.2023

ДЕТОНАЦІЙНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДУ TiAl З ДОБАВКАМИ НЕМЕТАЛЕВИХ ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК

А.Л. Борисова, А.І. Кільдій, Т.В. Цимбаліста, М.А. Васильківська

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

Приведено результати отримання, дослідження структури, фазового складу детонаційних покриттів з композиційних порошоків (КП) на основі інтерметаліду TiAl та неметалевих тугоплавких сполук (B_4C , BN, SiC, Si_3N_4). Детонаційне напilenня з КП проводилося з використанням автоматичного детонаційного комплексу «Перун-С», а в якості робочих газів—суміші «пропан—бутан—кисень», розріджувачем і транспортуючим газом було повітря. КП для детонаційного напilenня отримано методом механохімічного синтезу (МХС) з подальшим конгломеруванням. Розмір частинок КП складав 40...80 мкм. Встановлено, що основні зміни фазового складу детонаційних покриттів у порівнянні з вихідним КП полягають у появі великої кількості оксидних фаз; у композиції TiAl- B_4C - TiO_2 , Ti_3O_5 ; TiAl-BN - Ti_3O_5 , TiO, TiO_2 ; TiAl-SiC- TiO_2 , Ti_3O_5 , SiO_2 ; TiAl- Si_3N_4 - TiO_2 , TiO, SiO_2 . Найбільш щільна однорідна структура отримана в покриттях з КП TiAl-SiC і TiAl- Si_3N_4 . Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 16.

Ключові слова: інтерметаліди системи Ti-Al, неметалеві тугоплавкі сполуки, детонаційні покриття

Вступ. Завдяки низькій густині, високій питомій міцності, хорошим механічним властивостям при підвищених температурах і стійкості до впливу навколишнього середовища інтерметаліди TiAl вже використовуються для деяких компонентів автомобільної, авіаційної промисловості, у тому числі для турбокомпресорів або низьконапірних лопаток турбін. Проте деякі властиві сплавам TiAl недоліки, такі як низька пластичність і низька ударна в'язкість, як і раніше, стримують їх більш широке використання в якості об'ємного матеріалу. З іншого боку, TiAl може застосовуватися в якості захисного покриття, наприклад, для титанових сплавів. Основні переваги TiAl покриттів в тому, що вони мають густину нижчу в порівнянні з покриттями сплаву MCrAlY, гарну відповідність титановим сплавам з точки зору термічних і механічних властивостей, а також здатність утворювати міцне зчеплення з металевою основою за рахунок взаємодифузії при меншій схильності до утворення крихких фаз. Крім того, додавання легуючих елементів може знизити швидкість окислення та покращити механічні властивості бінарного сплаву TiAl. Для забезпечення сплаву TiAl високої міцності, жорсткості та зносостійкості застосовують частинки SiC, TiB_2 , B_4C , TiC, Al_2O_3 та ін. [1–4].

Покриття на основі TiAl можуть бути отримані декількома способами, серед яких найбільшого поширення набули газотермічне напilenня [5, 6] та алітування [7].

Серед різних методів термічного напilenня покриттів з TiAl більшість досліджень було зосереджено на плазмовому, високошвидкісному газо-

кисневому (HVOF), холодному, детонаційному і електродуговому напilenні.

Що стосується покриттів, отриманих за допомогою детонаційного напilenня, то дані дослідження в основному відносяться до TiAl [8–13], Ti_3Al [12, 14], TiAlCr [15].

При цьому в роботах [10, 11, 14] крім інтерметалідів у покриттях були виявлені невеликі кількості карбиду, нітриду та оксиду титану. Ці вторинні фази є на межах або всередині ламелей, залежно від механізму утворення. Формування таких включень вторинної фази іноді здійснюють свідомо, оскільки вони надають чи посилюють специфічні характеристики покриттів. Наприклад, нітрид титану було включено до складу TiAl-покриття для підвищення трибологічних властивостей цих покриттів [14]. Покриття з алюмініда титану, нанесені з використанням гідрованого титану [16], відрізнялися більшою твердістю, термостійкістю та стійкістю до окислення порівняно з покриттями, нанесеними з вихідного алюмініда титану [12]. Процес детонаційного напilenня може використовуватися для отримання наноструктурованих алюмотитанових покриттів з більш високою мікротвердістю, ніж відповідні плазмові покриття. Отримання багатошарових алюмотитанових покриттів із звичайних і наноструктурованих порошоків з шарами, що чергуються, з частково розплавленого наноструктурного матеріалу представлені в роботі [11]. У роботі [14] представлені результати дослідження складу покриттів, отриманих методом детонаційного напilenня з порошоків Ti_3Al у середовищах різного

Борисова А.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-7376-3370>, Кільдій А.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8133-8705>,

Цимбаліста Т.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9569-7776>, Васильківська М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-8311-6428>,

© А.Л. Борисова, А.І. Кільдій, Т.В. Цимбаліста, М.А. Васильківська, 2023

хімічного складу шляхом зміни співвідношення O_2/C_2H_2 . У цих покриттях поряд з Ti_3Al виявлено TiN та Ti_2N , які утворюються за рахунок реакції нагрітих частинок з азотом, який використовується для транспортування порошку. Крім того, дослідження показали, що в умовах детонаційного наплення відбувається сильне окислення Ti_3Al , що сприяє втраті алюмінію.

У роботах [11, 12] автори виявили, що з механолегованого порошку $Ti - 50$ ат. % Al можна отримати керамічне покриття на основі сполуки Al_2TiO_5 при окисному впливі робочого газового середовища на порошок. Покриття на основі алюмінідів титану з включеннями TiN можуть формуватися при впливі робочого газового середовища (повітря, азот) на порошок. У той же час при використанні литого порошку $TiAl$ (γ) його фазовий склад наслідують покриттям. Таким чином, покриття, отримані з механолегованих і литих порошоків, різні як за структурою, так і за фазовим складом. Використання порошоків, отриманих механолегуванням, дозволяє не тільки варіювати фазовий склад покриттів за рахунок високої хімічної активності наноструктурного рентгеноаморфного матеріалу, що напильється, але і забезпечує нові можливості для створення оптимальної структури покриття.

Метою даної роботи було дослідження процесів формування покриттів при напленні детонаційним методом з композиційних порошоків на основі інтерметаліду $TiAl$ з добавками неметалевих тугоплавких сполук (B_4C , BN , SiC , Si_3N_4).

Характеристика вихідних матеріалів та методика дослідження. В якості вихідних матеріалів для отримання покриттів методом детонаційного наплення використовували порошок інтерметаліду $TiAl$, що містить (мас. %): 62,5 Ti і 37,5 Al (Т65Ю35) та композиційні порошки (КП) на його основі з введенням в їх склад неметалевих тугоплавких сполук (НТС), таких як B_4C , BN , SiC , Si_3N_4 .

Композиційні порошки $TiAl/НТС$ отримували методом механохімічного синтезу (МХС) у високоенергетичному реакторі «Активатор 2SL» при часі обробки 1,5 год. Технологія отримання КП такого типу детально описана у роботі [17]. Для конгломерування порошоків використовували полівініловий спирт (ПВС) в кількості 3 %.

Для дослідження вихідних порошоків та напелених покриттів застосовували методи металографічного, рентгеноструктурного фазового (РСФА) та мікродіорометричного аналізу з побудовою варіаційних кривих мікротвердості.

Вибір режиму детонаційного наплення. Наплення покриттів проводили на детонаційній установці «Перун-С». В якості робочих газів використовували суміш «пропан–бутан – кисень»,

в якості розріджувача і транспортуючого газу – повітря.

При виборі режиму детонаційного наплення була виконана серія експериментів з оцінкою впливу на якість покриття ступеня заповнення стовбура детонаційної установки робочим газом, визначення оптимальної дистанції наплення, оптимальної циклограми процесу, а також витрати транспортуючого газу і товщини покриття, яка формується за один цикл.

Для дослідження впливу ступеня заповнення стовбура на якість покриттів змінювали витрату повітря в суміші (від 0,4 до 1,15 m^3/c) при постійному співвідношенні витрати робочих газів (пропана–бутану та кисню) 1:3 та дистанції наплення 100 мм, що відповідає зміні у зв'язку з цим ступеня заповнення стовбура від 58,3 до 76 %. Найбільш оптимальним для отримання якісних покриттів виявилось співвідношення робочих газів (пропан–бутан+кисень+повітря) 1:3,1:1,3 для наплення покриттів із порошку $Ti-Al$ з розміром частинок 40...100 μm та ступенем заповнення стовбура установки 64 %.

При зміні дистанції наплення було обрано 4 відстані від дульного зрізу установки до основи з інтервалом 40 мм (70, 110, 150, 190 мм). Було встановлено, що при напленні на дистанції 70 мм покриття щільне, з чітко визначеною границею, однак і основа, і покриття мають кольори побіжалості, які викликані, мабуть, перегріванням основи та покриття. Крім того, при малій дистанції наплення може деформуватися основа і під дією термічних напружень можуть з'являтися мікротріщини в покритті. При напленні на дистанції 110 мм покриття щільне, у формуванні покриття беруть участь частинки порошку всіх розмірів: в частинках малих розмірів ще не знизилася температура та швидкість, границя покриття злегка розмита, температура основи та покриття ~ 300 °С. Покриття на дистанції наплення 150 мм формується частинками порошку середнього та великого розміру, а частинки малого розміру на цій дистанції втрачають швидкість та температуру. Пляма покриття більше за діаметр стовбура, границя розмита, пористість покриття збільшена. На дистанції наплення 190 мм покриття формується з частинок великого розміру, що не втратили швидкість та температуру. Покриття з великих частинок порошку має значну пористість, границя плями розмита, на основі можна побачити сліди рикошету великих частинок. При збільшенні дистанції наплення температура і швидкість частинок, що напильються, знижується, що призводить до утворення пухкого покриття і зменшення міцності зчеплення, що може призвести до відшарування покриття від ос-

нови. Таким чином, за результатами отриманих при напиленні покриттів на різних дистанціях напилення була обрана дистанція напилення 110 мм.

Для отримання якісного покриття необхідно, щоб частинки порошку, що напилюється, взаємодіючи з продуктами детонації, набули необхідних енергетичних характеристик, тобто температуру 0,8...0,9 від температури плавлення матеріалу порошку, швидкість частинок порошку 600...1000 м/с на виході зі стовбура. Отримання таких характеристик досягається оптимальною величиною завантаження порошку в стовбур – відстанню між дульним зрізом і місцезнаходженням порції матеріалу, що напилюється, в момент вибуху суміші. Розмір завантаження порції порошку регулюється циклограмою. Циклограма забезпечує імпульс транспортуючого газу для доставки порції (хмари) порошку в потрібне місце стовбура в момент ініціації вибуху газової суміші. Вибір циклограми необхідно узгоджувати зі ступенем заповнення стовбура сумішшю робочих газів так, щоб порошкова хмара не виходила за межі суміші. В установці «Перун-С» передбачено 8 циклограм (по чотири на кожен дозатор), за допомогою яких можливе нанесення покриттів із порошкових матеріалів з різною густиною та різними розмірами частинок. Для подачі порошку в потрібне місце стовбура (при даному ступені заповнення) встановлено циклограму 2-2 (дозатор 2), яка призначена для напилення порошоків густиною 3...9 г/см³ та розміром частинок – 10...50 мкм, що забезпечує розташування порошкової хмари довжиною 200 мм з відстанню від дульного зрізу до передньої частини хмари 150 мм. Частота генерації при напиленні покриттів становила 6,6 с⁻¹.

Величиною витрати транспортуючого газу регулюють величину порції порошку для отримання певної товщини покриття за 1 цикл. Для даної детонаційної установки з довжиною стовбура 550 мм і діаметром стовбура 20 мм оптимальною є порція порошку (більшість матеріалів, що напилюються), при напиленні якої товщина покриття за 1 цикл становить 4...6 мкм. Збільшення порції порошку (і товщини покриття) викликає неоднакове нагрівання рухомих частинок в центрі і по периферії металізаційного потоку. Зменшення порції порошку веде до зниження товщини покриття, що є економічно недоцільним.

Для порошоків TiAl з щільністю 3,0...3,8 г/см³ витрати композиційних порошоків на установці ПЕРУН-С становила 0,9...1,2 кг/год.

Таким чином, для напилення покриттів з порошоків на основі TiAl з температурою плавлення основи 1200 °С та розміром частинок 40...100 мкм був обраний режим із співвідношенням робочих газів 1:3,1:1,3 та їх витратами: пропан-бутан – 0,5 м³/год, кисень – 1,55 м³/год, по-

вітря – 0,65 м³/год. Ступінь заповнення стовбура становила 64 %. Для подачі порошку у потрібне місце стовбура (при даному ступені заповнення) встановлена циклограма 2-2 (дозатор 2). Витрата транспортуючого газу для порошоків із густиною 3,0...3,8 г/см³ та розміром частинок 40...100 мкм становила 0,15...0,3 м³/год. Дистанція напилення – 110 мм.

Результати досліджень та їх обговорення. Методом РСФА у вихідному порошку Т65Ю35 TiAl виявлено фази TiAl (γ -фаза), Ti₃Al (рис. 1, а). Після розмелювання у планетарному млині відбувається розширення дифракційних ліній та зменшення їх інтенсивності (рис. 1, б), що свідчить про часткову аморфізацію порошку.

Для з'ясування механізму фізико-хімічної взаємодії компонентів у КП в умовах методу детонаційного напилення спочатку було досліджено покриття трьох типів із порошку TiAl без добавок НТС: 1) з вихідного порошку в стані постачання; 2) з порошку, підданого обробці в планетарному млині протягом 1,5 год; 3) з порошку, який піддається обробці в планетарному млині з подальшим конгломеруванням.

Дослідження структури детонаційних покриттів з TiAl порошку всіх трьох типів показало, що отримані покриття щільні, без тріщин і відшарувань від основи, містять великі темно-сірі оксидні ламелі, невелику кількість тонких світлих ламелів і деформованих світлих частинок (рис. 2). У покритті з подрібненого та конгломерованого порошку структура більш дрібнодисперсна з найбільш рівномірним розподілом світлих та темних ламелей (рис. 2, в). Мікротвердість у покриття з вихідного порошку – 5330 ± 800 МПа, а в покриттях з дробленого порошку і обробленого в планетарному млині з подальшим конгломеруванням практично не відрізняється (середні значення відповідно 3990 ± 800, 4190 ± 630 МПа), а найбільш ймовірні (рис. 3) 3975 та 4010. Методом

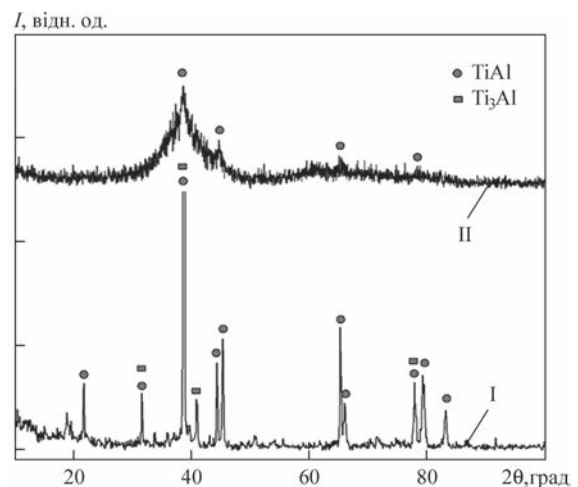


Рис. 1. Рентгенограми вихідного порошку TiAl (а) та порошку TiAl після механічного подрібнення в планетарному млині (б)

РСФА встановлено, що в покриттях з порошків TiAl всіх трьох типів основними фазами є оксиди TiO_2 , Al_2O_3 , TiO (рис. 4). Вміст інтерметалідних фаз TiAl і Ti_3Al в покриттях із конгломерованого порошку дещо збільшується відносно покриття з вихідного порошку (сліди). Що стосується кількісного фазового складу слід відзначити наявність більш інтенсивних піків інтерметалідних фаз на рентгенограмах із подрібнених порошків; крім того, судячи з інтенсивності рентгенівських ліній вміст TiO_2 більший у покритті з вихідного порошку TiAl (на рис. 4, а), ніж у покриттях з подрібнених порошків (рис. 4 б, в), крім того, в подрібнених порошках виявлені сліди оксиду Ti_3O_5 . Ці відмінності можуть бути пов'язані з дисперсністю частинок порошку, що напильється (табл. 1). Більш високі розміри частинок 2-го і 3-го типу порівняно з 1-м, пояснюється формуванням більших частинок за рахунок процесів зварювання при ме-

ханічній обробці порошку в планетарному млині і надалі при конгломеруванні.

На основі аналізу результатів проведених досліджень (табл. 1) для отримання композиційних порошків та покриттів із них були обрані TiAl-порошки двох типів: порошок, оброблений у планетарному млині протягом 1,5 год; порошок, оброблений у планетарному млині протягом 1,5 год з подальшим конгломеруванням.

Для нанесення детонаційних покриттів використовували композиційні порошки TiAl/HTC, отримані методом МХС як у вихідному стані, так і після додаткової обробки – конгломерування (табл. 2). При цьому були виявлені деякі відмінності в структурі та фазовому складі отриманих покриттів.

Дослідження структури детонаційних покриттів із композиційного порошку TiAl/ B_4C показало, що з неконгломерованого порошку (рис. 5, а) структура щільна, без тріщин та відшарувань, ла-

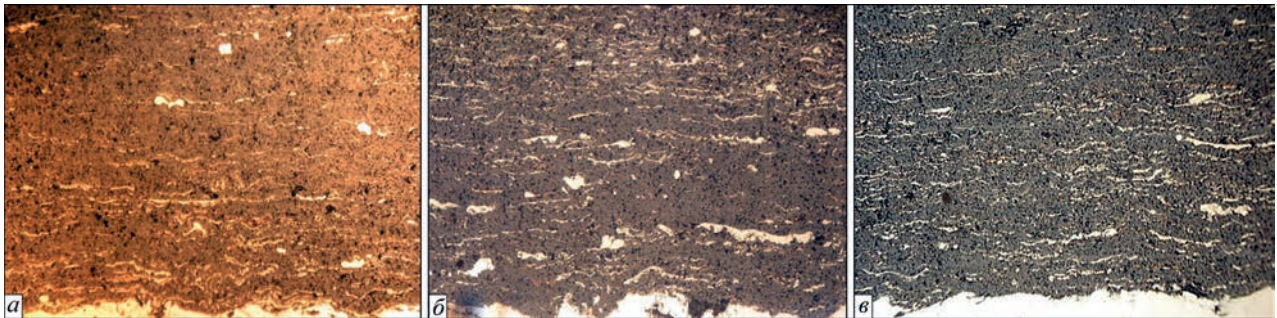


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 400$) детонаційного покриття з порошку TiAl: а – вихідний порошок; б – порошок, отриманий розмолем у планетарному млині протягом 1,5 год; в – порошок, отриманий розмолем з подальшим конгломеруванням

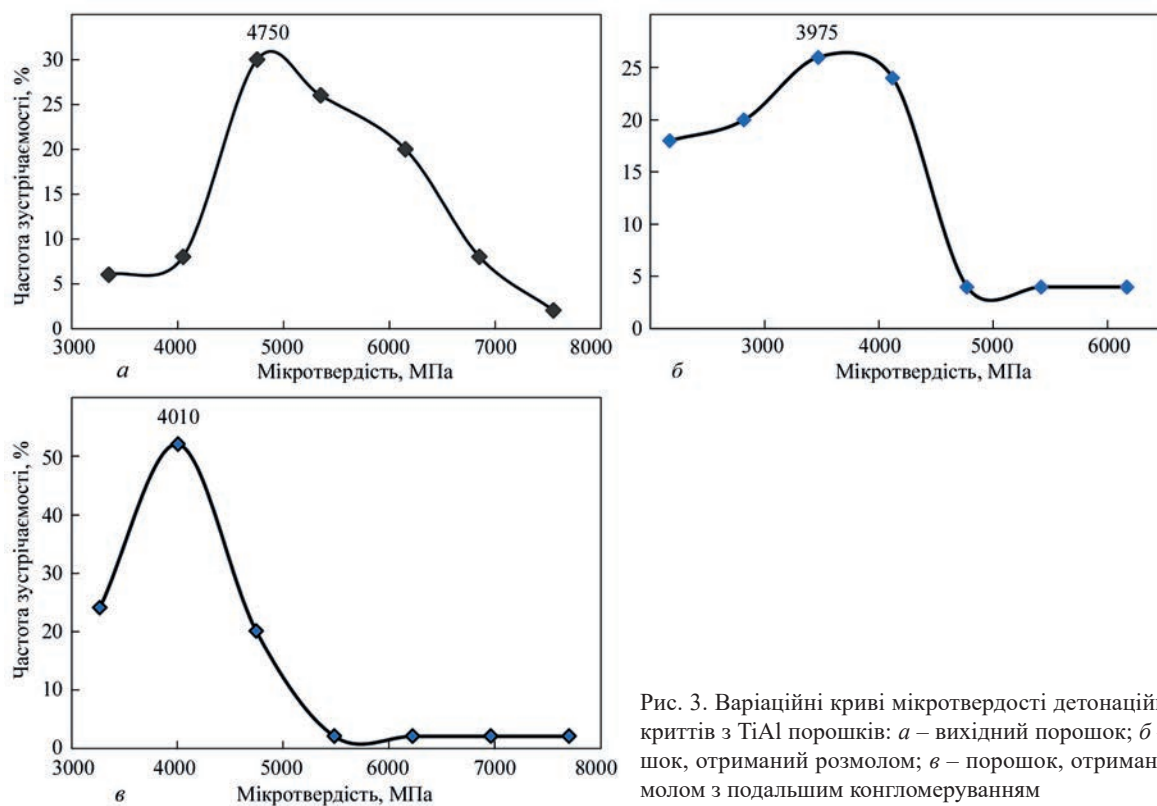


Рис. 3. Варіаційні криві мікротвердості детонаційних покриттів з TiAl порошків: а – вихідний порошок; б – порошок, отриманий розмолем; в – порошок, отриманий розмолем з подальшим конгломеруванням

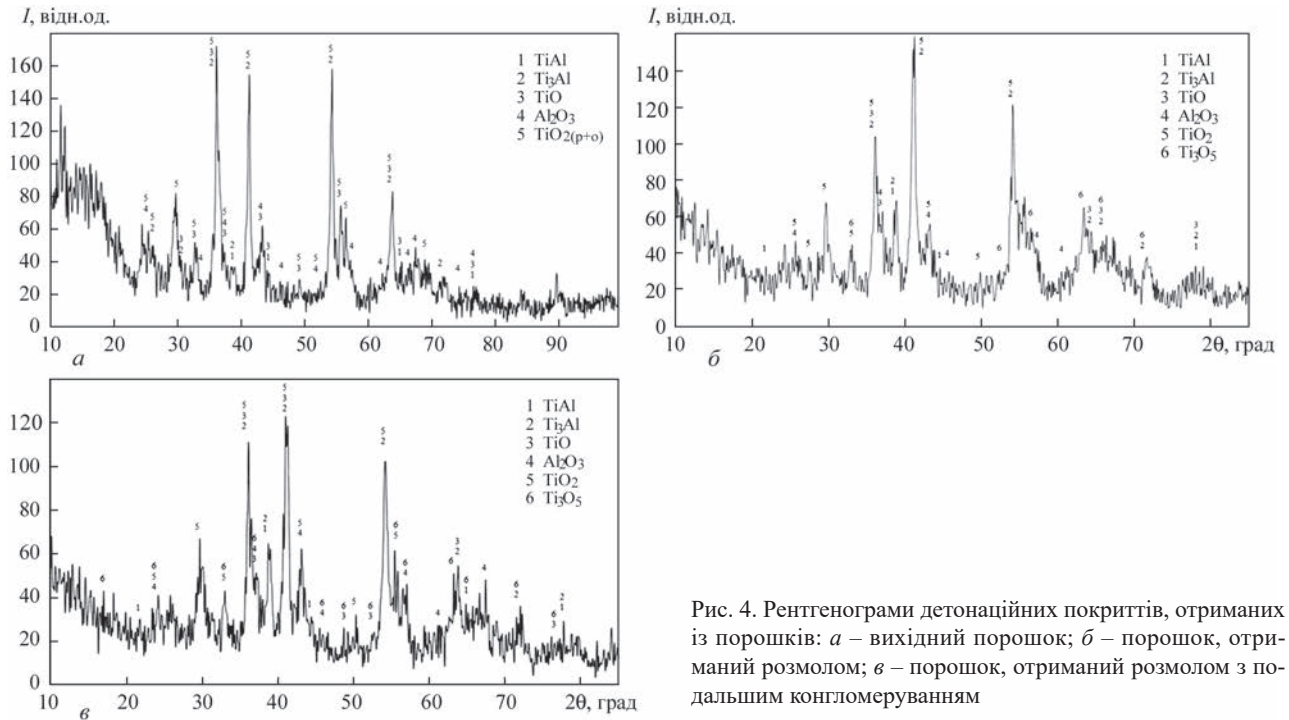


Рис. 4. Рентгенограми детонаційних покриттів, отриманих із порошків: а – вихідний порошок; б – порошок, отриманий розмолом; в – порошок, отриманий розмолом з подальшим конгломеруванням

Таблиця 1. Характеристика TiAl порошків та детонаційних покриттів із них

| Порошок | | | Покриття | | | |
|---|----------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------|---|
| Тип | Розмір частинок, мкм | Фазовий склад | Мікротвердість, МПа (P = 50 г) | | Пори-стість, % | Фазовий склад |
| | | | Середня | Найбільш ймовірна | | |
| Вихідний (1-ий тип) | ≤20 | TiAl, Ti ₃ Al | 5330 ± 800 | 4750 | 0,8 | TiO, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , сліди-TiAl, Ti ₃ Al |
| Оброблений у планетарному млині протягом 1,5 год (2-ий тип) | 4...80 | | 3990 ± 800 | 3975 | 2,2 | TiAl, Ti ₃ Al, TiO ₂ , TiO, Al ₂ O ₃ , сліди Ti ₃ O ₅ |
| Оброблений з наступним конгломеруванням (3-ій тип) | 40...80 | | 4190 ± 630 | 4010 | 2,6 | |

Таблиця 2. Характеристика детонаційних покриттів, одержаних з композиційних порошків

| Характеристика порошку | | | | Характеристика покриття | | | | |
|--|------------------------|------------------------------|---|-------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------|---|
| Склад суміші для КП, мас. % | Метод отримання | Розмір частинок порошку, мкм | PCФА | Товщина покриття, мкм | Мікротвердість, МПа (P = 50 г) | | Пори-стість, % | PCФА |
| | | | | | Середня | Найбільш ймовірна | | |
| TiAl B ₄ C (16 % B ₄ C) | МХС, 1,5 год. | ≤ 22 | TiAl, Ti ₃ Al, TiB ₂ , TiC | 175 ± 25 | 5550 ± 1084 | 5090 | 4 | TiAl, Ti ₃ Al, TiC, TiB ₂ , AlB ₂ , TiO ₂ , Ti ₃ O ₅ , сліди-Al ₂ O ₃ |
| | МХС, 1,5 год + конгл. | 40...100 | | 460 ± 30 | 4760 ± 1060 | 5200 | | |
| TiAl + BN (18 % BN) | МХС, 1,5 год | ≤ 19 | TiAl, Ti ₃ Al, TiB ₂ , AlB ₂ , TiN, AlN, BN | 215 ± 15 | 4880 ± 1200 | 5700 | 3 | Ti ₃ O ₅ , TiO, TiO ₂ , TiN, TiB ₂ , AlB ₂ , сліди: TiAl, Ti ₃ Al |
| | МХС, 1,5 год + конгл. | 20...80 | | 440 ± 30 | 4040 ± 850 | 4300 | 12 | Ti ₃ O ₅ , TiO ₂ , TiN, TiB ₂ , AlB ₂ , Al ₂ TiO ₅ , сліди: TiAl, Ti ₃ Al |
| TiAl + SiC (16 % SiC) | МХС, 1,5 год. + конгл. | ≤ 19 | TiAl, Ti ₃ Al, SiC, TiC, Ti ₅ Si ₃ | 410 ± 70 | 4230 ± 750 | 5000 | 4 | TiC, Ti ₅ Si ₃ , TiO ₂ , Ti ₃ O ₅ , SiO ₂ , сліди: Ti ₃ Al, TiAl |
| | МХС, 1,5 год + конгл. | 40...100 | | 480 ± 46 | 5250 ± 800 | 5700 | 2,9 | |
| TiAl + Si ₃ N ₄ (18 % Si ₃ N ₄) | МХС, 1,5 год. | ≤ 14 | TiAl, Ti ₃ Al, TiN, Si ₃ N ₄ , Ti ₅ Si ₃ , AlN | 385 ± 50 | 4010 ± 670 | 4000 | 2,1 | Ti ₃ Al, TiN, Ti ₅ Si ₃ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ TiO ₅ , сліди: AlN, TiAl |
| | МХС, 1,5 год + конгл. | 40...100 | | 500 ± 20 | 5440 ± 970 | 4975 | 4,4 | |

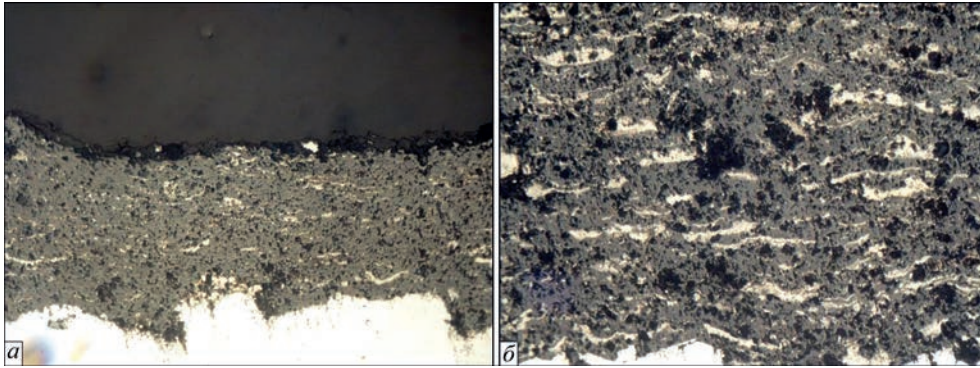


Рис. 5. Мікроструктура ($\times 400$) детонаційних покриттів із композиційних порошоків $\text{TiAl}/\text{B}_4\text{C}$, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

мелярна, складається з темно-сірих та має невелику кількість тонких світлих ламелей. У структурі покриття, отриманого з конгломерованого порошку (рис. 5, *б*), спостерігається більша кількість світлих ламелей та нерозпвлених частинок із дрібними темно-сірими вклученнями. Мікротвердість покриття з порошоків обох типів відрізняється незначною мірою. Середні значення становлять 5550 ± 1080 та 4760 ± 950 МПа відповідно (найбільш ймовірні 5090 та 5200) (рис. 6). При порівнянні фазового складу покриттів (рис. 7) з вихідним порошком (табл. 2) можна відзначити збільшення кількості боридних і карбідних фаз – продуктів взаємодії компонентів КП в процесі наплення та появу оксидів, в першу чергу, титану,

внаслідок взаємодії частинок КП з детонаційним потоком в процесі наплення. При цьому можна відзначити, що покриття з конгломерованого порошку містить меншу кількість оксидних фаз, що пов'язано з меншою питомою поверхнею частинок, яка контактує з навколишнім середовищем. З іншого боку, процес міжфазної взаємодії в частинках конгломерованого порошку протікає більш активно, що позначається на фазовому складі – зростає кількість продуктів взаємодії TiAl з B_4C та знижується вміст TiAl та Ti_3Al .

У детонаційних покриттях з композиційних порошоків TiAl/BN при виготовленні шліфа відбувається викришування окремих ділянок покриття, що свідчить про крихкість фаз,

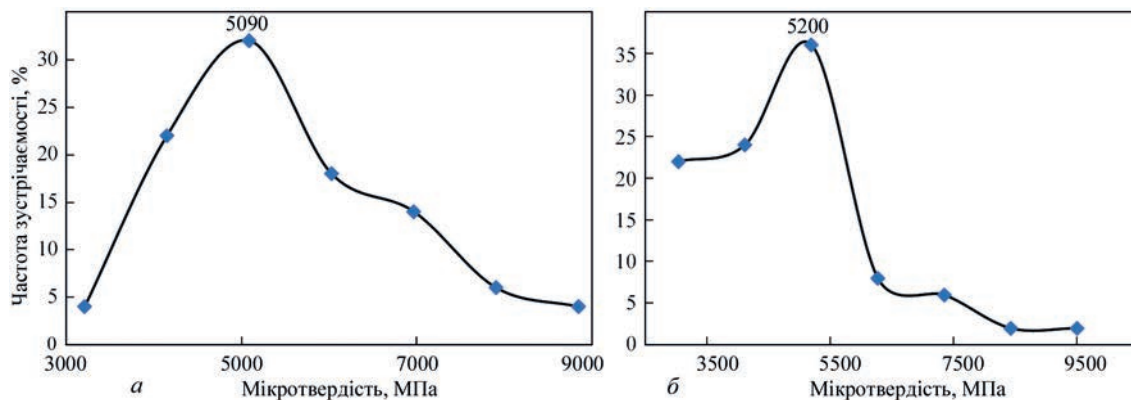


Рис. 6. Варіаційні криві мікротвердості детонаційних покриттів з композиційних порошоків $\text{TiAl}/\text{B}_4\text{C}$, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

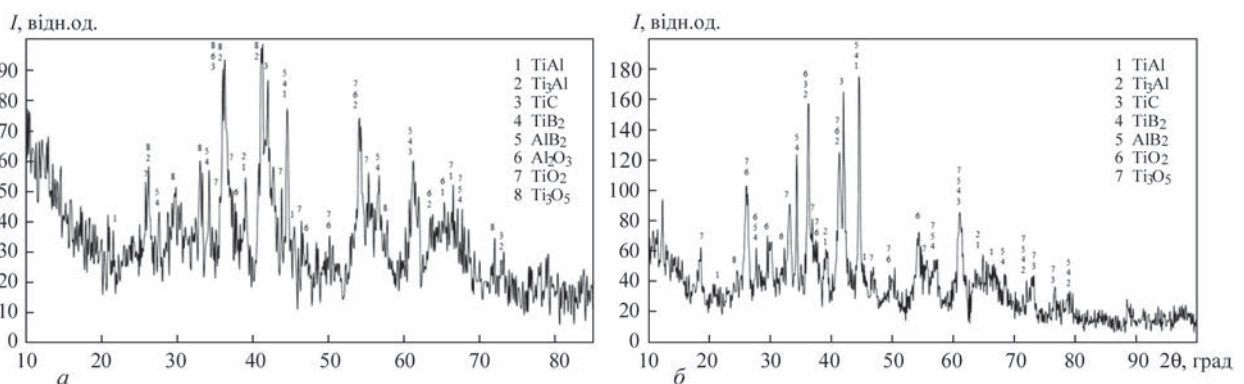


Рис. 7. Рентгенограми детонаційних покриттів з композиційних порошоків $\text{TiAl}/\text{B}_4\text{C}$, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

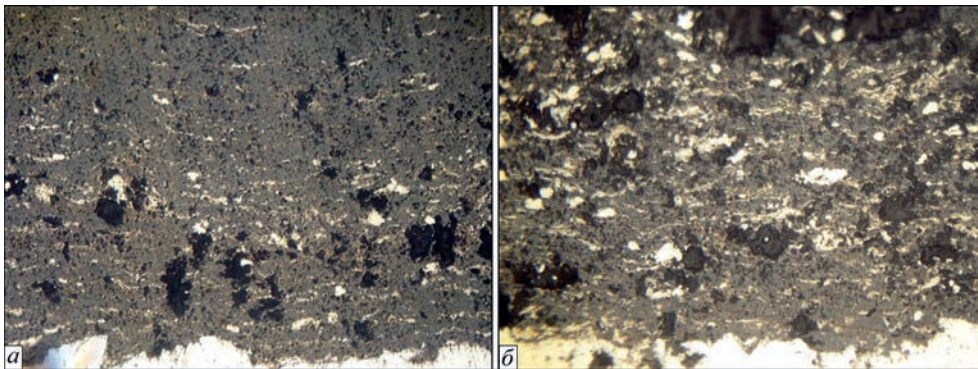


Рис. 8. Мікроструктура ($\times 400$) детонаційних покриттів з композиційних порошоків TiAl/BN, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

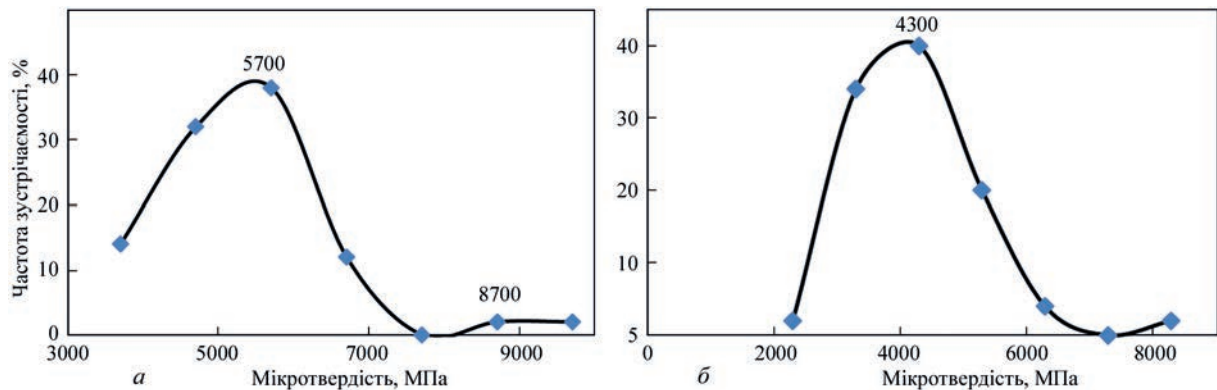


Рис. 9. Варіаційні криві детонаційних покриттів з композиційних порошоків TiAl/BN, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

що утворюються (рис. 8). Покриття, отримане з порошку МХС, сильно окислене, має темно-сіре забарвлення з дрібними тонкими світлими ламелями (рис. 9, *a*). У покритті з порошку, отриманого МХС, з подальшим конгломеруванням (рис. 9, *б*), спостерігається більша кількість світлих ламелей і нерозплавлених частинок. Мікротвердість покриття з порошку МХС становить 4880 ± 1200 МПа, а з порошку МХС з подальшим конгломеруванням – 4040 ± 850 МПа. Зниження мікротвердості покриттів із КП TiAl/BN із конгломерованих порошоків відмічено і на варіаційних кривих (рис. 9).

Методом РСФА встановлено, що у покритті з МХС порошку менша кількість інтерметалідних фаз (TiAl, Ti₃Al) порівняно з вихідним порошком.

Основна фаза в цьому покритті – це оксид Ti₃O₅, у покритті виявлені також сліди фаз – TiN, TiB₂, AlB₂, AlN та оксиди – TiO₂, TiO (рис. 10, *a*). У покритті з порошку МХС з подальшим конгломеруванням методом РСФА виявлено, що покриття менш окислене порівняно з покриттям з МХС порошку, містить невелику кількість TiAl, Ti₃Al, в покритті виявлено збільшення вмісту фаз TiN, TiB₂, AlB₂, і окрім оксидів Ti₃O₅, TiO₂ в покритті присутня високотемпературна оксидна фаза Al₂TiO₅ (рис. 10, *б*).

Структура детонаційних покриттів із композиційних порошоків TiAl/SiC щільна, без тріщин і відшарувань від основи, з великими темно-сірими оксидними ламелями та тонкими світлими ламелями (рис. 11). Середнє значення мікротвердості покриття з МХС порошку нижче, ніж у покриття

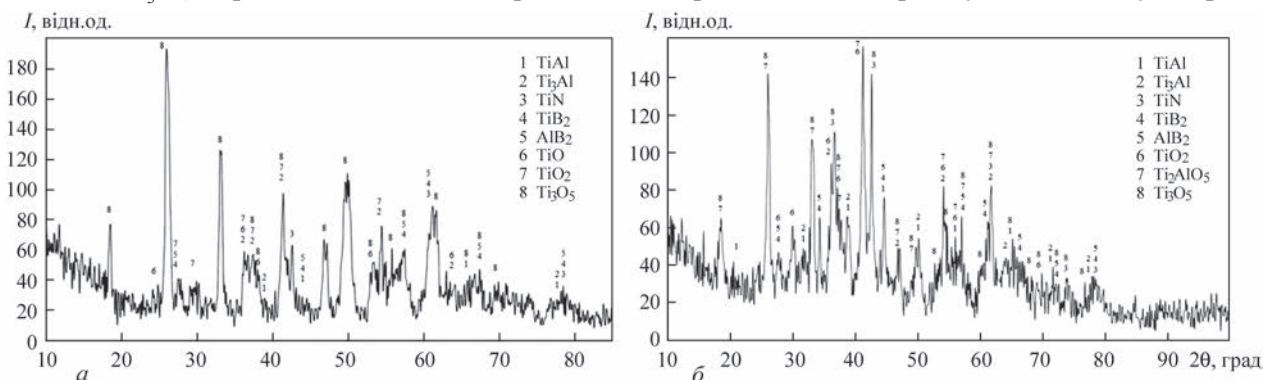


Рис. 10. Рентгенограми детонаційних покриттів з композиційних порошоків TiAl/BN, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

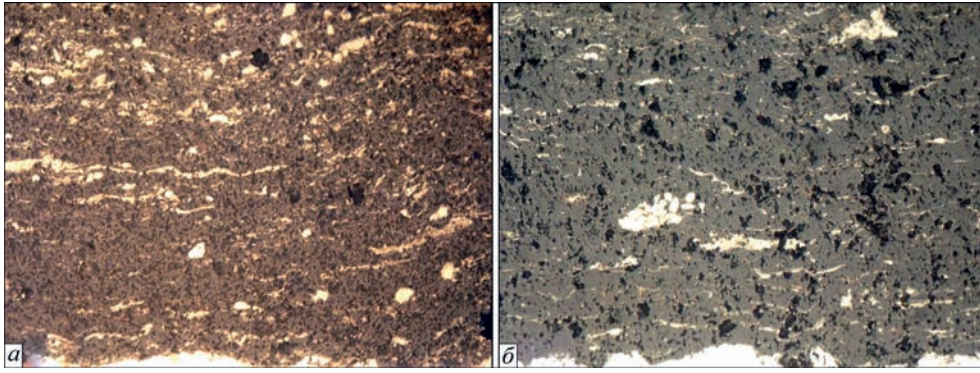


Рис. 11. Мікроструктура детонаційних покриттів з композиційних порошоків TiAl/SiC, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

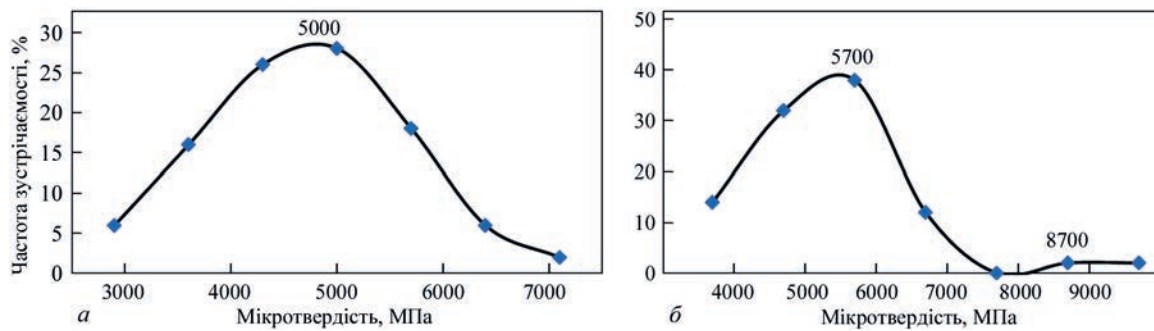


Рис. 12. Варіаційні криві детонаційних покриттів з композиційних порошоків TiAl/SiC, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

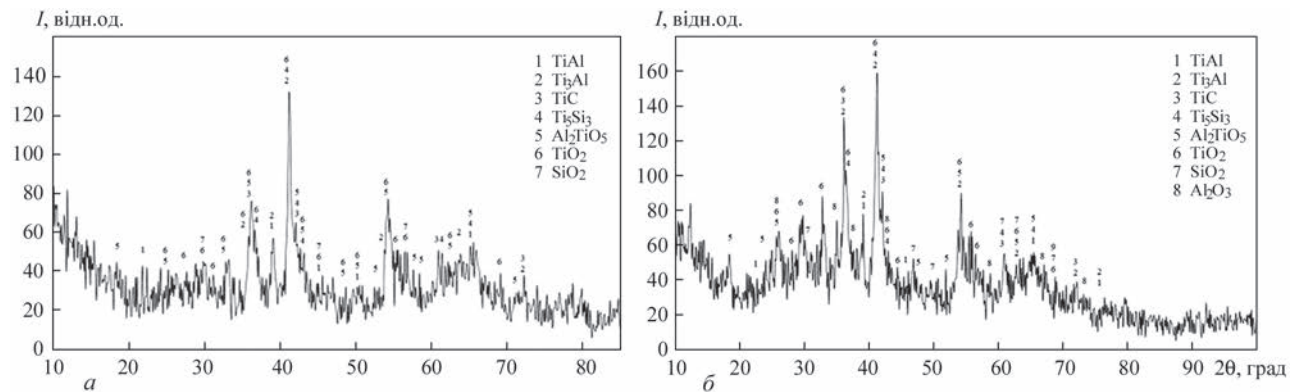


Рис. 13. Рентгенограми детонаційних покриттів з композиційних порошоків TiAl/SiC, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

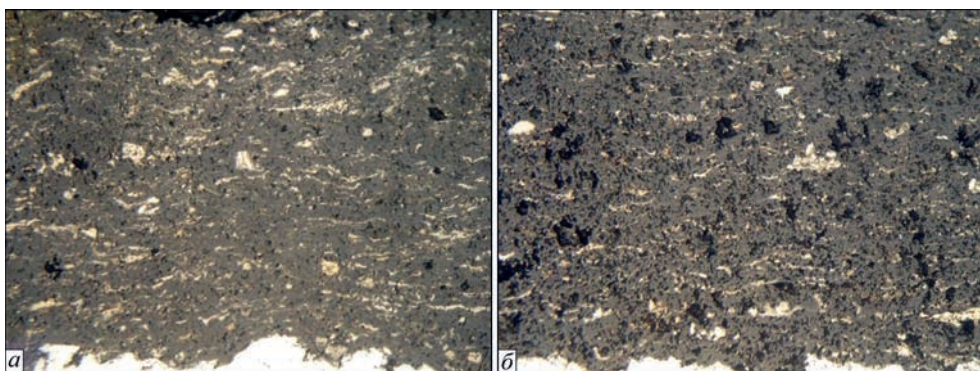


Рис. 14. Мікроструктура детонаційних покриттів з композиційних порошоків TiAl/Si₃N₄, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

з МХС порошку з подальшим конгломеруванням (4230 ± 750 і 5250 ± 800 МПа, відповідно), що пов'язано з більш щільною структурою покриття з МХС порошку з подальшим конгломеруванням.

Більш низькі значення мікротвердості отримані на варіаційних кривих (рис. 12) для покриттів із неконгломерованого порошку.

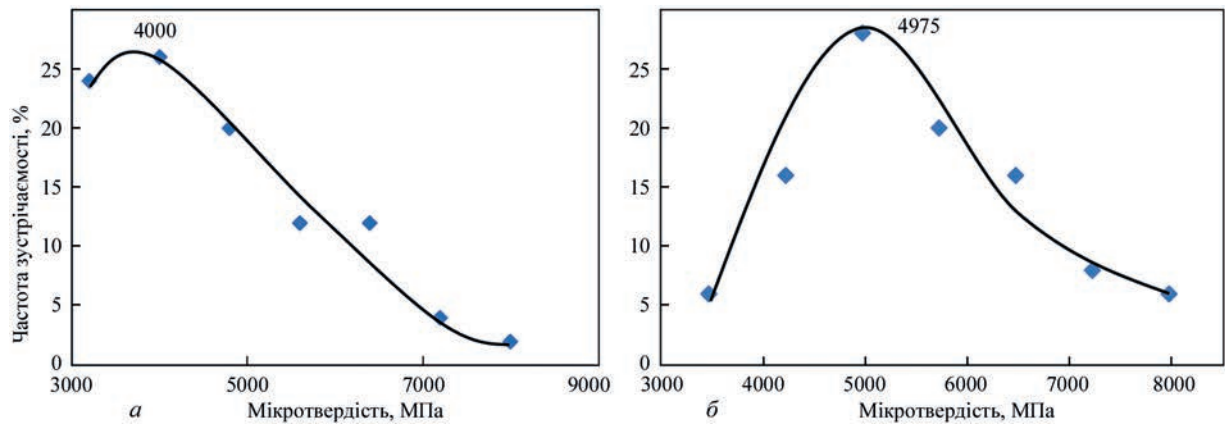


Рис. 15. Варіаційні криві детонаційних покриттів з композиційних порошків $\text{TiAl/Si}_3\text{N}_4$, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

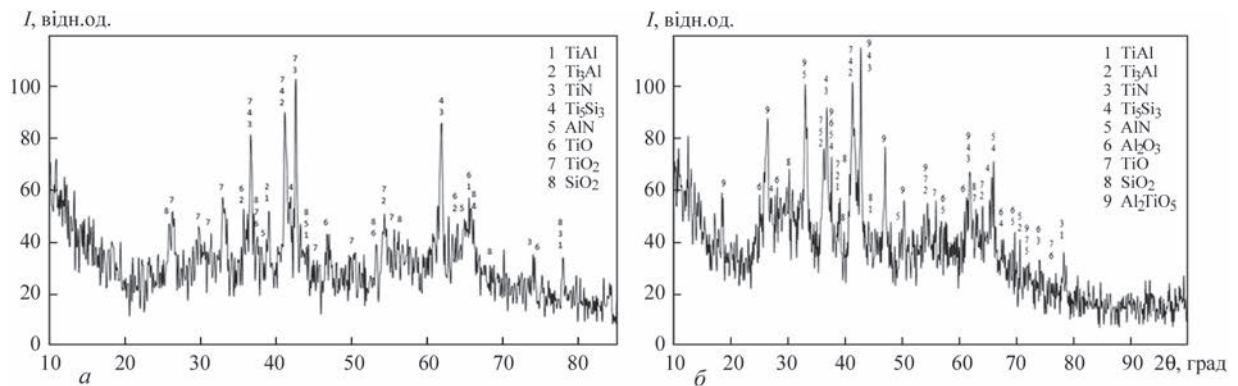


Рис. 16. Рентгенограми детонаційних покриттів з композиційних порошків $\text{TiAl/Si}_3\text{N}_4$, отриманих методами: *a* – МХС; *б* – МХС з подальшим конгломеруванням

На рентгенограмах покриттів (рис. 13) крім основних фаз TiAl , Ti_3Al , TiC , Ti_5Si_3 , які є в порошку, виявлені оксиди – TiO_2 , SiO_2 , Al_2TiO_5 , Ti_3O_5 .

Структури детонаційних покриттів з композиційних порошків $\text{TiAl/Si}_3\text{N}_4$ подібні до структур покриттів з композиційних порошків TiAl/SiC : щільні, без тріщин і відшарувань від основи, з великими темно-сірими оксидними ламелями і тонкими світлими ламелями (рис. 14). Мікротвердість покриття з МХС порошку нижче, ніж у покриття з порошку МХС з подальшим конгломеруванням (4010 ± 670 і 5440 ± 970 МПа, відповідно), що як і у випадку КП TiAl/SiC пов'язано з більш щільною структурою покриття з порошку МХС з подальшим конгломеруванням. Така сама закономірність відзначена і для найімовірніших значень мікротвердості на варіаційних кривих (рис. 15).

На рентгенограмах (рис. 16, *a*, *б*) виявлені як основні фази, характерні для вихідного порошку TiAl , Ti_3Al , TiN , Ti_5Si_3 , AlN , так і оксиди TiO_2 , SiO_2 , TiO – в покритті з порошку МХС.

Висновки

1. В результаті дослідження впливу технологічних параметрів на формування детонаційних покриттів з інтерметаліду TiAl та композиційних порошків на його основі з добавками неметалевих

тугоплавких сполук (B_4C , BN , SiC , Si_3N_4) встановлено режим отримання якісних покриттів, що відрізняються високою щільністю структури та відсутністю дефектів на границі з основою.

2. При детонаційному напиленні з порошку TiAl відбувається окислення його частинок з утворенням оксидів титану (TiO , TiO_2 , Ti_3O_5) та алюмінію (Al_2O_3). Вміст оксидів у покритті залежить від дисперсності порошку. Так, у покриттях із конгломерованих порошків воно нижче, ніж у покритті із порошків, підданих лише дробленню.

3. При формуванні детонаційних покриттів з КП TiAl/HTC відбувається як окислення частинок, що напилюються, так і процеси міжфазної взаємодії його компонентів. Так, у покриттях з КП $\text{TiAl}/\text{B}_4\text{C}$ виявлено оксиди TiO_2 , Ti_3O_5 , Al_2O_3 , а також підвищений вміст TiC , TiB_2 , AlB_2 порівняно з вихідним КП. У покриттях з КП TiAl/BN основні фази – це оксиди TiO , TiO_2 , Ti_3O_5 , бориди TiB_2 , AlB_2 нітрид TiN . При цьому BN , який ще зберігся у вихідному КП, у покритті не було виявлено. При нанесенні покриттів з TiAl/SiC і $\text{TiAl/Si}_3\text{N}_4$ окислення протікає менш активно, ніж у попередніх випадках, а в КП $\text{TiAl/Si}_3\text{N}_4$ менш активно протікає і процес міжфазної взаємодії.

4. Порівняння структури та фазового складу детонаційних покриттів з МХС порошків і порошків, отриманих методом МХС з подальшим конгломеру-

ванням, показує, що в другому випадку відзначається зниження вмісту оксидів для всіх композицій, а вміст продуктів міжфазної взаємодії між TiAl і включенням неметалевої тугоплавкої сполуки зростає.

5. Структура покриттів всіх складів ламелярна, складається з темно-сірих (оксидних) і світлих (металоподібних) ламелей. У покриттів, отриманих з МХС-порошків з подальшим конгломеруванням, вона більш щільна і однорідна, ніж у покриттів з порошків, не підданих конгломеруванню. Підтвердженням більш високого ступеня однорідності структури та фазового складу є і розподіл мікротвердості на варіаційних кривих.

Список літератури/References

1. Gotman I., Koczak, M.J. (1994) Fabrication of Al matrix in situ composites via self-propagating synthesis. *Materials and science and engineering*, 187, 189–199.
2. Han, Ch., Babicheva, R., Chu, J. et al. (2020) *Microstructure and mechanical properties of (TiB+TiC)/Ti composites fabricated in situ via selective laser melting of Ti and B4C powders*. Additive Manufacturing.
3. Pfeiler, M., Zechner, J., Penoy, M. et al. (2009) Improved oxidation resistance of TiAlN coatings by doping with Si or B. *Surface and Coatings Technology*, 203, 3104–3110.
4. Wu, H., Cui, X.P., Geng, L. et al. (2013) Fabrication and characterization of in-situ TiAl matrix composite with controlled microlaminated architecture based on SiC/Al and Ti system. *Intermetallics*, 43, 8–15.
5. Gan, J.A., Berndt, Ch.C. (2015) Thermal spray forming of titanium and its alloys. *Titanium Powder Metallurgy*, 425–446.
6. Cinca, N., Guilemany, J.M. (2012) Thermal spraying of transition metal aluminides: An overview. *Intermetallics*, 24, 60–72.
7. Goral, M., Swadzba, L., Moskal G. et al. (2011) Diffusion aluminide coatings for TiAl intermetallic turbine blades. *Intermetallics*, 19, 744–747.
8. Venkataraman, R., Ravikumar, B., Krishnamurthy, R., Das, D.K. (2006) A study on phase stability observed in as sprayed Alumina-13 wt.% Titania coatings grown by detonation gun and plasma spraying on low alloy steel substrates. *Surface and Coatings Technology*, 201, 3087–3095.
9. Semenov, S., Cetegen, B. (2002) Experiments and modeling of the deposition of nanostructured alumina-titania coatings by detonation waves, *Materials Science And Engineering A*, 335(1-2), 67–81.
10. Cetegen, B., Semenov, S., Goberman, D. (2003) Deposition of multi-layered alumina-titania coatings by detonation waves. *Scripta Materialia*, 48, 1483–1488.
11. Оликер В.Е., Сыроватка В.Л., Тимофеева И.И. и др. (2005) Влияние свойств порошков алюминидов титана и условий детонационного напыления на фазо- и структурообразование покрытий. *Порошковая металлургия*, 9-10, 74–84.
12. Olikier, V.E., Syrovatka, V.L., Timofeeva, I.I. et al. (2005) Influence of properties of titanium aluminide powders and conditions of detonation spraying on phase- and structure formation of coatings. *Poroshk. Metallurgiya*, 9-10, 74–84 [in Russian].
13. Olikier, V., Syrovatka, V., Timofeeva I. et al. (2006) Formation of detonation coatings based on titanium aluminide alloys and aluminium titanate ceramic sprayed from mechanically alloyed powders TiAl. *Surface and Coatings Technology*, 200, 3573–3581.
14. Оликер В.Е., Сыроватка В.Л., Гридасова Т.Я. и др. (2009) Влияние газовой среды на эволюцию структуры и фазовый состав в процессе напыления детонационных покрытий механохимически синтезированных порошков Ti–Al–B. *Порошковая металлургия*, 11-12, 12–20.
15. Olikier, V., Syrovatka, V., Gridasova, T.Ya. et al. (2009) Influence of gas environment on evolution of structure and phase composition during spraying process of detonation coatings of mechanochemically synthesized Ti-Al-B powders. *Poroshk. Metallurgiya*, 11-12, 12–20 [in Russian].
16. Dudina, D., Korchagin, M., Zlobin S. et al. (2012) Compositional variations in the coatings formed by detonation spraying of Ti3Al at different O₂/C₂H₂ ratios. *Intermetallics*, 140–146.
17. Оликер, В., Кресанов, В. (2000) Structure and properties of detonation coatings based on γ-TiAl. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 39, 590–593.
18. Братаніч Т.І., Скороход В.В., Копилова Л.І. та ін. (2010) Деструктивне гідрування та рекомбінація сплаву α₂-Ti₃Al – шлях до одержання монолітних наноконкомпозитів та покриттів з покращеними властивостями. II. Рекомбінація Ti₃Al та одержання детонаційних покриттів. *Порошковая металлургия*, 9-10, 132–141.
19. Bratanich, T.I., Skorokhod, V.V., Kopylova, L.I. et al. (2010) Destructive hydrogenation and recombination of α₂-Ti₃Al alloy as a way to produce solid nanocomposites and coatings with improved properties. Pt. 2. Recombination of Ti₃Al and producing of detonation coatings. *Poroshk. Metallurgiya*, 9-10, 132–141 [in Ukrainian].
20. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Бурлаченко О.М. та ін. (2021) Композиційні порошки на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з добавками тугоплавких сполук для газотермічного нанесення покриттів. *Автоматичне зварювання*, 11, 44–52.
21. Borysov, Yu.S., Borysova, A.L., Burlachenko, O.M. et al. (2021) Composite powders based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with additives of refractory compounds for thermal spraying of coatings. *The Paton Welding J.*, 11, 44–52.

DETONATION COATINGS BASED ON TIAL INTERMETALLICS WITH ADDITIONS OF NON-METALLIC REFRACTORY COMPOUNDS

A.L. Borysova, A.I. Kildii, T.V. Tsymbalista, M.A. Vasylykivska

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

E-mail: tstania@ukr.net

The results of producing and examination of structure and phase composition of detonation coatings from composite powders (CP) based on TiAl intermetallics and non-metallic refractory compounds (B₄C, BN, SiC, Si₃N₄) are presented. Detonation spraying with CP was carried out using the automatic detonation complex “Perun-S”. As working gases, the mixture “propane-butane-oxygen” and as diluent and transporting gas air were used. CP for detonation spraying was produced by the method of mechanochemical synthesis (MChS) with a subsequent conglomeration. The size of CP particles was 40...80 μm. It was revealed that the main changes in the phase composition of detonation coatings as compared to the original CP consist in the appearance of a large number of oxide phases; in the composition TiAl–B₄C – TiO₂, Ti₃O₅; TiAl–BN – Ti₃O₅, TiO, TiO₂; TiAl–SiC–TiO₂, Ti₃O₅, SiO₂; TiAl–Si₃N₄–TiO₂, TiO, SiO₂. The most dense and homogeneous structure was obtained in the coatings with CP TiAl–SiC і TiAl–Si₃N₄. 17 Ref., 2 Tabl., 16 Fig.

Keywords: Ti-Al intermetallics, non-metallic refractory compounds, detonation coatings

Надійшла до редакції 9.01.2023

МАШИНА ДЛЯ КОНТАКТНОГО ТОЧКОВОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

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

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

Контактне мікрозварювання з-за невеликої тривалості імпульсу зварювального струму виконується на конденсаторних машинах і машинах постійного струму з транзисторним регулюванням, які мають деякі недоліки (не достатні характеристики регулювання, складність, ненадійність). У розробленій машині для контактного мікрозварювання на змінному струмі підвищеної частоти ці недоліки усунуто. У ній управління циклом зварювання виконується мікроконтролером, регулюємий імпульс зварювального струму формується транзисторним інвертором мостового типу, пружинний привід переміщення та стиску електродів виконано на основі лінійного привода з кроковим двигуном. Із застосуванням теорії подібності при проектуванні режимів мікрозварювання на розробленій машині можна використовувати всі бази даних режимів зварювання металів середніх і великих товщин на промисловій частоті. Бібліогр. 8, рис. 5.

Ключові слова: контактне мікрозварювання, змінний струм, висока частота, інверторне джерело живлення, електро-механічний привід стиску, мікропроцесорне управління, спеціальна форма імпульсів, стабілізація струму

Вступ. Контактне мікрозварювання широко застосовується в електронній промисловості, машинобудуванні, приладобудуванні тощо, причому галузі її застосування постійно розширюються. У порівнянні зі зварюванням металів середньої і великої товщини мікрозварювання має ряд особливостей [1]. У першу чергу це мала теплова інерційність зварюваних точок. Якщо представити зварювану точку в першому наближенні як інерційну ланку першого порядку, то його теплова постійна T згідно з теорією подібності [2] буде $T \equiv \delta^2/a$, де δ – товщина зварюваних деталей, a – коефіцієнт теплопроводності зварюваного металу. Ця залежність підтверджується математичним моделюванням процесу зварювання. Так, для зварювання листів заліза завтовшки 1,0 + 1,0 мм математичне моделювання дало $T = 60$ мс, а для листів завтовшки 0,2 + 0,2 мм – $T = 2,2$ мс. При цьому якщо при зварюванні струмом з частотою 50 Гц листів 1,0 + 1,0 мм пульсації температури в центрі точки складали 10 %, то при товщині листів 0,2 + 0,2 мм температура з фазовим зсувом ~ 30 ел. град. повторює форму зварювального струму. Тому для подібності теплових процесів при зварюванні будь-яких товщин згідно з теорією подібності час зварювання $t_{зв}$ і частота зварювального струму f повинні задовольняти наступним умовам: $t_{зв} \equiv \delta^2/a$ і $f \equiv a/\delta^2$.

Ще однією з особливостей мікрозварювання є зміна відношення початкового контактного опору деталь-деталь до власного опору зварюваних деталей оборотно пропорційно до товщини. У результаті зі зменшенням товщини зварюваних деталей різко зростає ймовірність початкових виплесків розплавленого металу з зони зварювання.

З цієї причини збільшується вплив форми переднього фронту імпульсу зварювального струму та здатність системи її регулювати у широких межах.

Існує велика кількість типів формувачів імпульсів зварювального струму для точкового контактного зварювання [3]. З них для контактного мікрозварювання внаслідок особливостей, зазначених вище, основне розповсюдження отримали формувачі імпульсів конденсаторного типу [4] і в останній час – формувачі імпульсів постійного струму на основі транзисторних регуляторів [5, 6]. Перевагою конденсаторних машин є їх простота, недоліком – громіздкість, обмежені можливості управління формою імпульсу зварювального струму та неможливість регулювання параметрів імпульсу зварювального струму під час зварювання. Формувачі імпульсів зварювального струму на основі транзисторних регуляторів мають ідеальні регульовальні характеристики, які дозволяють реалізувати будь-які зварювальні цикли та автоматичне регулювання параметрів зварювання. Проте вони є досить складними і, відповідно, коштовнішими та менш надійними.

Метою даної роботи була розробка машина для контактного мікрозварювання на змінному струмі підвищеної частоти, що має всі переваги конденсаторних машин і машин постійного струму при відсутності їх недоліків.

Принципово машини для контактного мікрозварювання нічим не відрізняються від машин для зварювання середніх і великих товщин на змінному струмі, якщо дотримуватися умов подібності [2]: частота зварювального струму $f \equiv \delta^{-2}$, опір зварювального контуру $Z_k \equiv \delta^{-1}$ і маса рухомих частин

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

Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© Ю.М. Ланкін, Є.М. Байштрук, В.Ф. Семікін, І.Ю. Романова, 2023

машини $m \equiv \delta^5$. Високочастотні машини змінного струму для контактного мікрозварювання є простими, надійними та дешевими, як конденсаторні машини, і одночасно забезпечують високоякісне автоматичне регулювання та стабілізацію технологічних параметрів, як машини постійного струму, при порівняннях з ними масогабаритних характеристиках. Контактне зварювання металу великих і середніх товщин у переважній більшості випадків здійснюється на машинах змінного струму з частотою 50 Гц. За багато десятків років накопичилась велика база даних режимів зварювання. Її можна використовувати і для контактного мікрозварювання на змінному струмі з використанням теорії подібності.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблено машину для контактного мікрозварювання на змінному струмі підвищеної частоти. Загальний вигляд машини наведено на рис. 1. Основними блоками машини є мікроконтролерний блок управління, інверторний блок формування імпульсу зварювального струму, електроприводний блок переміщення та стиску електродів.

Програмна зміна в процесі циклу зварювання величини зварювального струму, переміщення та величини зусилля стиску електродів здійснюється мікроконтролером PIC16F873.

Блок формування імпульсу зварювального струму. Спрощену принципову електричну схему силового блоку машини наведено на рис. 2.

Напруга U_z «Струм», яка є пропорційною заданому зварювальному струму, формується керуючим мікроконтролером і через резистор R1 надходить на не інвертуючий вхід EA підсилювача розузгодження ШІМ-контролера DA1. Сигнал зворотного зв'язку за зварювальним струмом формується трансформатором струму ТА. Первинна обмотка трансформатора струму включена в діа-



Рис. 1. Загальний вигляд машини для контактного мікрозварювання на змінному струмі підвищеної частоти

гональ силового транзисторного мосту інвертора послідовно з первинною обмоткою зварювального трансформатора Т1.

Напруга на R2, що є пропорційною зварювальному струму та утворюється випрямленим струмом вторинної обмотки трансформатора ТА, через резистор R3 подається на інвертуючий вхід $\bar{E}A$ підсилювача розузгодження контролера DA1. На той же вхід через резистор зворотного зв'язку R5 подається напруга з виходу СМР вбудованого підсилювача розузгодження. Ланцюг С1–R6 забезпечує стійкість і сприятливі перехідні процеси системи зворотного зв'язку за зварювальним струмом. Напруга з R2 через резистор R4 також надходить на вхід СL контролера, виконуючи швидкодіючий захист при перевищенні зварювальним струмом максимального допустимого значення. Сигнал «Зварювання», що генерується управлячим контролером, через резистор R7 подається на вхід SS-контролера DA1 і слугує для вмикання/вимикання зварювального струму. Частота інвертора 1,5 кГц задається конденсатором С4 і резистором R8.

Для гальванічного розв'язання схеми управління з силовими транзисторами VT1–VT4, що знаходяться під потенціалом живлячої мережі, використано інтегральні оптронні драйвери TLP250. Вхідні оптрони драйверів підключено до виходів контролера DA1 через резистори R11–R14. Для драйверів необхідно мати індивідуальні ізольовані джерела живлення. Їх виконано на мікросхемі DA2 і високо-частотному трансформаторі Т2. Напруга вторинних обмоток трансформатора Т2 випрямляється однополуперіодними випрямлячами VD7–VD9.

Силовий міст виконано на транзисторах з ізольованим затвором VT1–VT4 типу G4PC50W. Транзистори шунтовано силовими швидкодіючими діодами VD3–VD6. Живлення мосту здійснюється постійною напругою 300 В, яку отримують безпосередньо випрямленням напруги мережі. Терморезистор R20 з негативним коефіцієнтом температурного опору обмежує початковий струм заряду конденсатора С10 фільтру, захищаючи випрямляч VD2 від перевантаження. Конденсатори С7–С9 і дросель L1 захищають мережу від проникнення в неї високочастотних перешкод, які генеруються інвертором.

На рис. 3 наведено осцилограми миттєвого значення напруги U і згладжені криві середнього значення струму I_{cp} первинної обмотки зварювального трансформатора.

Порівняння записів струму при короткому замиканні електродів і зварюванні показує, що навіть при дуже значних збуреннях система стабілізації працює досить ефективно: середнє значення струму при короткому замиканні дорівнює 8,09 А, а при зварюванні – 8,45 А. При необхідності ста-

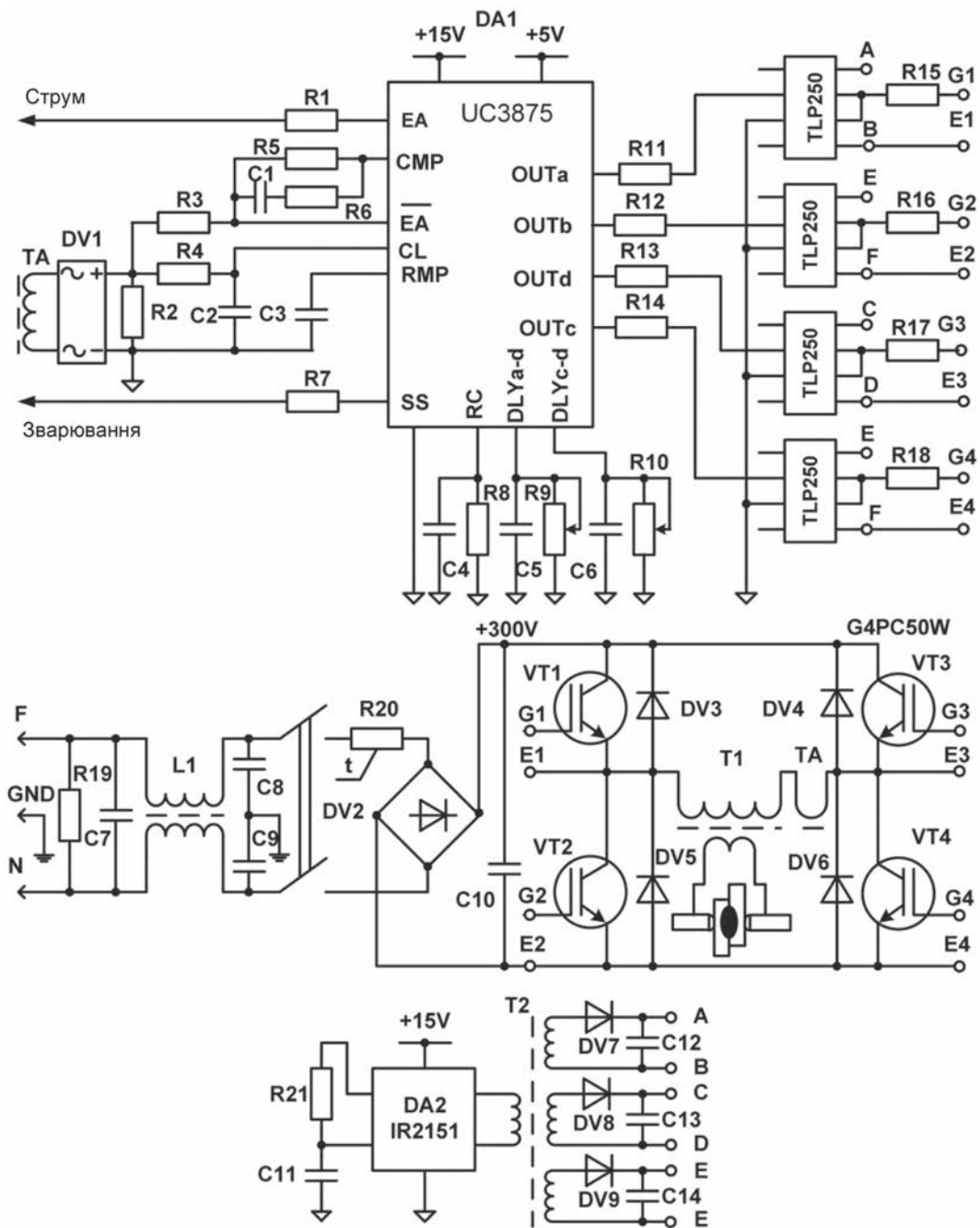


Рис. 2. Спрощена принципова схема силового блоку машини для контактної мікрозварювання

більшість зварювального струму можна підвищити за рахунок збільшення коефіцієнта передачі підсилювача розузгодження контролера DA1 і застосування датчика ефективного значення зварювального струму. З рис. 3 також видно, що регулятор відпрацює збурення також і в джерелі живлення при зниженні напруги з 340 до 240 В.

Для підвищення якості зварного з'єднання, як правило, застосовується плавне наростання переднього фронту потужності зварювального струму [7]. Оптимальний закон зміни переднього фронту імпульсу залежить від умов зварювання та підбирається експериментально. Для спрощення завдання режиму зварювання в алгоритмі управління мікропроцесора запрограмовано чотири

стандартних види переднього фронту імпульсів зварювального струму U_z «Струм»: 1 – ступінчастий, 2 – експоненційний, 3 – S-подібний, 4 – лінійний. При цьому задається тривалість наростання та кінцевий рівень струму. На рис. 4 наведено осцилограми відпрацювання програм наростання зварювального струму при вмиканні.

Сигнал зварювального струму частотою 1,5 кГц з-за фазового управління має складну форму. Для наочності подання сигнал струму випрямлено та відфільтровано низькочастотним фільтром. Як видно з рис. 4, зварювальний струм I точно слідує за напругою U_z , що задається.

Блок переміщення та стиску електродів. У зварювальній машині, що розглядається, застосовано

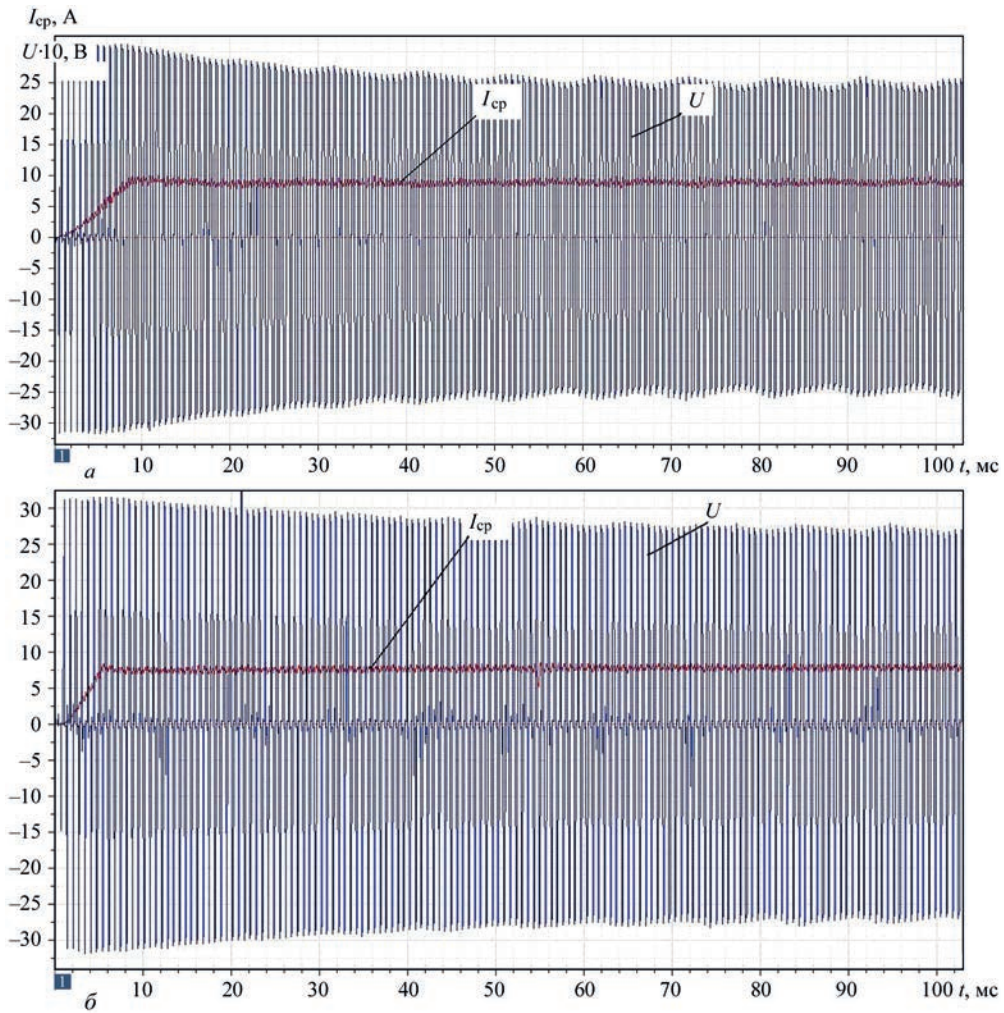


Рис. 3. Осцилограми струму та напруги первинної обмотки зварювального трансформатора в режимах короткого замикання (а) та зварювання листів нержавіючої сталі завтовшки 0,3 + 0,3 мм (б)

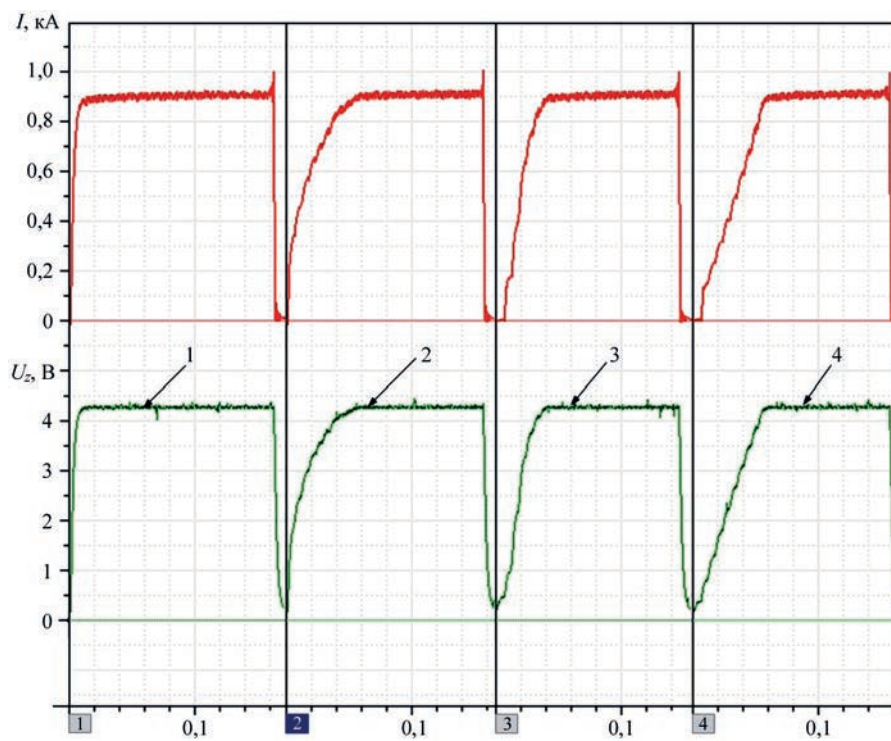


Рис. 4. Осцилограми відпрацювання програми наростання зварювального струму при вмиканні

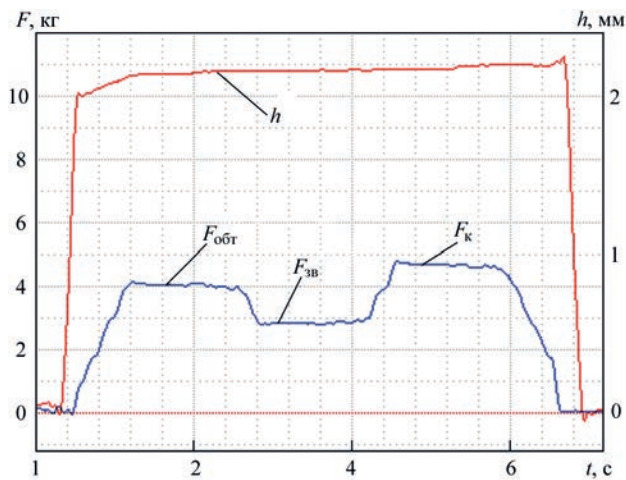


Рис. 5. Приклад роботи приводу переміщення та стиску електродів, де h – відносне переміщення електродів; $F_{\text{обт}}$ – зусилля попереднього обтиску електродів; $F_{\text{зв}}$ – зусилля стиску електродів під час проходження струму крізь зварюваний метал; $F_{\text{к}}$ – кувальне зусилля

пружинний привод переміщення та стиску електродів на основі лінійного приводу з кроковим двигуном (КД) ДШІ-200-2-1 [8]. Величина зусилля стиску електродів задається числом кроків КД. Максимальне зусилля стиску 58,8 Н (6 кгс), що змінюється з дискретністю 0,084 Н (7 гс) і максимальною швидкістю зміни 117,6 Н/с (12 кгс/с). Привід дозволяє виконувати безударну роботу електродів шляхом програмного зниження швидкості КД перед торканням електродом виробу, що зварюється. Це знижує механічний знос робочого торця електроду і таким чином збільшує інтервал часу між його заточуванням, підвищуючи продуктивність і збільшуючи строк служби електродів.

На рис. 5 наведено приклад циклограми роботи приводу переміщення та стиску електродів. На першій стадії циклу зварювання попередній обтиск $F_{\text{обт}}$ слугує для усунення проміжків між деталями, отримання необхідних значень контактних опорів електрод-деталь в холодному стані. На третій стадії циклу прикладають і підтримують кувальне зусилля $F_{\text{к}}$ для зниження розтягуючих напружень, зменшення жолоблення зварюваного виробу, попередження гарячих тріщин і раковин.

Висновки

Машини змінного струму на підвищеній частоті для контактної точкової мікрозварювання мають всі переваги найрозповсюдженіших у даний час конденсаторних машин і машин постійного струму при відсутності їх недоліків.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено машину для контактної мікрозварювання змінним струмом до 2,5 кА і частотою 1,5 кГц. Машина має привід стиску електродів зусиллям до 58,8 Н на основі лінійного приводу з кроковим двигуном. Мікропро-

цесорне управління забезпечує будь-який закон зміни імпульсу зварювального струму та зусилля стиску електродів.

Якість стабілізації зварювального струму або напруги на електродах можна підвищити, якщо замінити датчики їх середніх значень на відповідні датчики діючих значень.

Список літератури

1. Ланкін Ю.М. (2021) Вимоги до технічних характеристик машин контактної мікрозварювання. *Автоматичне зварювання*, **11**, 40–43. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.07>
2. Лебедев В.К., Яворский Ю.Д. (1960) Применение критериев подобия для определения режимов контактной сварки. *Автоматическая сварка*, **8**, 37–44.
3. Паэранд Ю.Э., Бондаренко Ю.В., Бондаренко А.Ф. (2008) Формирователи импульсов тока для контактной сварки. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, **3**, 25–30.
4. Моравский В.Э. (1963) *Сварка аккумулярованной энергии*. Киев, Гостехиздат УССР.
5. Леонов В.П., Атвуш В.Е., Греченкова Л.А., Баранщикова Л.А. (1987) Источник сварочного тока с программируемыми электрическими параметрами и формой импульса. *Сварочное производство*, **1**, 27–28.
6. Бондаренко О.Ф., Рижаква Т.О., Кожушко Ю.В. (2018) Вдосконалена методика оцінки втрат в імпульсних перетворювачах установок контактної мікрозварювання. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, **3**, 38–42. DOI: <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.3.38>
7. Бондаренко А.Ф. (2007) *Формирователи импульсов тока для установок контактной микросварки*: дис. канд. техн. наук. Алчевск, ДонГТУ.
8. Ланкин Ю.Н., Семикин В.Ф., Осечков П.П., Байштрук Е.Н. (2012) Привод сжатия электродов для машин контактной точечной микросварки. *Автоматическая сварка*, **2**, 54–56.

References

1. Lankin, Yu.M. (2021) Requirements to technical characteristics of resistance microwelding machines. *The Paton Welding J.*, **11**, 34–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.07>
2. Lebedev, V.K., Yavorsky, Yu.D. (1960) Application of similarity criteria for determination of resistance welding modes. *Avtomatich. Svarka*, **8**, 37–44 [in Russian].
3. Paerand, Yu.E., Bondarenko, Yu.V., Bondarenko, A.F. (2008) Current pulse formers for resistance welding. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, **3**, 25–30.
4. Moravsky, V.E. (1963) *Welding by accumulated energy*. Kyiv, Gostekhizdat Ukr.SSR.
5. Leonov, V.P., Atvush, V.E., Grechenkova, L.A., Baranshchikova, L.A. (1987) Welding current supply with programmed electric parameters and pulse shape. *Svarochn. Proizvodstvo*, **1**, 27–28 [in Russian].
6. Bondarenko, O.F., Ryzhakova, T.O., Kozhushko, Yu.V. (2018) Improved procedure of loss evaluation in pulse converters of resistance microwelding machines. *Tekhnologiya ta Konstruyuvanniya v Elektronnoy Aparaturi*, **3**, 38–42 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.3.38>
7. Bondarenko, A.F. (2007) *Current pulse formers for resistance microwelding machines*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Alchevsk, DonGTU [in Russian].
8. Lankin, Yu.N., Semikin, V.F., Osechkov, P.P., Bajshtruk, E.N. (2012) Electrode compression drive for resistance spot microwelding. *The Paton Welding J.*, **2**, 45–47.

MACHINE FOR RESISTANCE SPOT MICROWELDING

Yu.M. Lankin, E.M. Bayshtruk, V.F. Semikin, I.Yu. Romanova

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

Resistance microwelding due to a small duration of a welding current pulse is performed in condenser machines and DC machines with transistor adjustment, which have some disadvantages (not sufficient regulation characteristics, complexity and unreliability). In the designed machine for resistance microwelding on high frequency AC, these disadvantages are eliminated. In the machine, the control of the welding cycle is performed by a microcontroller, the regulating welding current pulse is formed by the transistor inverter of the bridge type, the spring drive for movement and compression of electrodes is made on the basis of a linear drive with a step motor. Applying the similarity theory when designing microwelding modes in the designed machine, it is possible to use all databases of the modes of welding metals of medium and large thicknesses at the industrial frequency. 8 Ref., 5 Fig.

Keywords: resistance microwelding, alternating current, high frequency, inverter power source, electromechanical compression drive, microprocessor control, special pulse shape, current stabilization

Надійшла до редакції 21.02.2022

Зварювання за кордоном

МЕТОД ПОДВІЙНОГО ІМПУЛЬСУ ВІД КЕМРРІ ДЛЯ TIG-ЗВАРЮВАННЯ

Зварювання TIG широко використовується при зварюванні металів, робота з якими вважається складним завданням, наприклад, з титаном. Це найпростіший і найбезпечніший метод досягнення високої якості роботи при невеликих витратах на обладнання. Однак необхідна кількість зварювальних проходів робить зварювання TIG повільним та трудомістким, що знижує продуктивність. Функція подвійного імпульсу у новому зварювальному апараті MasterTig від Kemppi була розроблена для підвищення ефективності зварювання TIG.

У Фінляндії зварювання титану вважається дуже складним завданням, при вирішенні якого на перший план виходить дотримання вимог щодо якості, що зазвичай важливіше за продуктивність. Оскільки титан все частіше стали використовувати у своїй роботі зварники, компанії починають шукати способи підвищення продуктивності традиційного зварювання TIG під час роботи з цим металом, особливо якщо товщина матеріалу менше за 6 мм. Витрати при зварюванні титану досить високі в порівнянні з кількістю отриманого в результаті роботи готового шва, тому навіть невелике збільшення продуктивності є цінним.

Як правило, титан має гарне співвідношення міцності та ваги, відмінні корозійну стійкість та властивості термостійкості. Ці характеристики є дуже важливими у реалізації найскладніших зварювальних проектів, де використовується саме титан, незважаючи на його високу ціну.

При розробці нового сімейства продуктів MasterTig компанія Kemppi прагнула підвищити ефективність зварювання TIG, особливо в роботі з тонкими матеріалами (0,5...6 мм), враховуючи всі вимоги та особливості при їх з'єднанні. Так було створено двоімпульсний варіант процесу TIG.

Переваги та можливості у використанні двоімпульсного зварювання TIG. Двоімпульсне TIG-зварювання поєднує в собі традиційне повільне і швидке зварювання.

Типові переваги повільної пульсації включають: поліпшений контроль зварювальної ванни; простота позиційного зварювання; візуально-привабливі зварні шви.

Переваги швидкої пульсації: краще сфокусована дуга; вища швидкість руху; найкращий контроль тепловкладення; глибше проникнення.

У новому сімействі продуктів Kemppi MasterTig функції і переваги повільного та швидкого імпульсного зварювання легко поєднуються, а діапазон оптимальних способів зварювання значно розширюється. Найбільш підходящим двоімпульсне TIG-зварювання є для тонких матеріалів; скруглених та кутових з'єднань; зварних швів з високими вимогами до візуальної якості; нержавіючих сталей; матеріалів, що вимагають низького тепловкладення, таких як високоміцні сталі, дуплексні та аустенітні матеріали; кольорових металів, що зварюються постійним струмом, таких як титан.

Результати під час тестування в реальних робочих умовах.

Turula Engineering – це фінська компанія, яка випускає продукцію з високою доданою вартістю. Підприємство працює у сфері виробництва машин та обладнання для гірничодобувної, металургійної, енергетичної та водної промисловості. Turula Engineering брала участь у пілотних випробуваннях нового MasterTig від Kemppi перед масовим запуском у виробництво цього типу зварювальних апаратів. Цікавий та складний проект компанії з виробництва обладнання, що працює під тиском, вимагав проведення великої кількості зварювальних робіт з використанням титану та ідеально підходив для демонстрації переваг нового двоімпульсного зварювання TIG від Kemppi у реальних умовах експлуатації.

Для компанії Turula Engineering двоімпульсне зварювання TIG допомогло скоротити кількість проходів при виробничому зварюванні титанових труб з трьох до одного, що призвело до значної економії часу та коштів. Вже в процесі початкових випробувань зварювання найпоширенішого з'єднання в даному проекті всього за один прохід виявилось значно простіше та надійніше. За словами зварників, подвійний імпульс «змішує» зварювальну ванну таким чином, що невеликі допущені неточності не призводять до недостатнього проплавлення. На додаток до цього, дозволений колір зварного шва досягається легше, оскільки тепловкладення при двоімпульсному зварюванні TIG нижче порівняно з традиційними процесами зварювання TIG. Зварники також відзначили, що закінчення зварювання легше контролювати — при зварюванні титану існує ризик того, що корінь виявиться глибшим у кінцевій точці. Крім того, зварювальні деформації були меншими через менше підведення тепла.

Завдяки отриманим відмінним результатам тестових випробувань двоімпульсне TIG зварювання було обрано для використання під час проведення більшості робіт у рамках проекту, що значно скоротило час підготовки до неї. При цьому майже всі перевірки пройшли без зауважень.

При TIG-зварюванні навіть невеликі зміни процесу можуть значно скоротити кількість слабких місць у зварювальному виробництві. Двоімпульсне зварювання TIG — це ще один крок вперед до економічніших робіт без шкоди для хорошої якості.

За матеріалом Internet



РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИПРОБУВАНЬ ЗВАРЮВАНОСТІ ПРИ СЕРТИФІКАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА СУДНОБУДІВНИХ СТАЛЕЙ

О.М. Костін

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9.
E-mail: kostin.weld@gmail.com

Сформульовано рекомендації щодо вибору зварювальних матеріалів для випробувань зварюваності при сертифікації виробництва листового прокату зі суднобудівних сталей підвищеної міцності. Показано, що сертифіковані зварювальні матеріали не забезпечують заявлені категорійні показники ударної в'язкості металу шва при збільшенні погонної енергії зварювання до 5,0 кДж/мм, що пов'язане з критичним, залежним від термічного впливу, ростом дендритів. У цьому зв'язку, для отримання гарантованого позитивного результату, контрольні зварні з'єднання слід розглядати як особливо відповідальні конструкції, що надає можливість, відповідно до Правил Класифікаційних Товариств (Регістр Ллойда – LR, Бюро Верітас – BV тощо), призначати до використання комбінації зварювальних матеріалів, які мають на одну категорію вище оптимальної, наприклад, 4Y замість 3Y або 5Y40 замість 4Y40. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: сертифікація виробництва, суднобудівні сталі, зварні з'єднання, зварювальні матеріали, випробування зварюваності

Вступ. Сучасне виробництво корпусів кораблів, стаціонарних нафтових та газових бурових платформ, вітроенергетичних установок та інших металоконструкцій прибережної зони морського виконання широко використовує листовий прокат із суднобудівних сталей підвищеної міцності. Основним технологічним процесом їх виготовлення є зварювання, якість якого залежить від багатьох факторів, у тому числі від здатності сталей витримувати термічні цикли нагріву при зварюванні. Відомо, що властивості зони термічного впливу (ЗТВ) в значній мірі залежать від фазових перетворень, характер яких визначається інтенсивністю та ступенем розвитку дифузійних процесів перерозподілу вуглецю та інших легуючих елементів і домішок в умовах впливу зварювального термічного циклу [1, 2]. Виконати аналітичну оцінку механічних властивостей високотемпературних ділянок ЗТВ за хімічним складом, особливо показників ударної в'язкості при від'ємних температурах, з урахуванням впливу багаторазового термічного навантаження, з достатньою для виробничої практики точністю, не представляється можливим [3, 4]. У цьому зв'язку, при сертифікації виробництва суднобудівних сталей, здатність листового прокату до зварювання визначають експериментальними методами. Найбільш достовірним способом оцінки є комплексні випробування контрольних зварних з'єднань у відповідності до вимог нормативних документів Класифікаційних Товариств (LR, BV тощо), які достатньо мірою синхронізовані в рамках участі останніх в міжнародних об'єднаннях IAKS та IMO [5, 6]. В цьому Костін О.М. – <http://orcid.org/0000-0002-4739-660X>
© О.М. Костін, 2023

випадку, вимоги до технології контрольного зварювання для оцінки зварюваності сталей багато в чому збігаються з основними положеннями міжнародного стандарту ДСТУ EN ISO 15614-1, рівень 2. Суттєвою відмінністю є необхідність обов'язкової сертифікації зварювальних матеріалів мінімум одним із Класифікаційних Товариств (КТ) та чітка регламентація щодо призначення, відповідно до категорії зварювальних матеріалів. Технологія контрольного зварювання не поширюється на виробництво суднокорпусних та офшорних конструкцій [5, 6].

Контрольне зварювання повинно виконуватись обов'язково автоматичним способом, на погонних енергіях $1,5 \pm 0,1$ та $5,0 \pm 0,2$ кДж/мм [5, 6], що повністю перекриває діапазони мінімальної та максимальної погонної енергії, які використовуються у виробничих умовах. Зварювання на погонних енергіях більше 5,0 кДж/мм є предметом спеціального розгляду КТ. Перевагу рекомендовано надавати дуговому зварюванню під флюсом (код 121 за ДСТУ EN ISO 4063), що, на нашу думку, пов'язане з широкими можливостями даного способу щодо забезпечення високої стабільності погонної енергії при зварюванні в указаному діапазоні значень, а також наявністю ефективної можливості управління геометрією та якістю формування швів.

Важливим етапом робіт при підготовці до контрольного зварювання є вибір комбінації зварювальних матеріалів дріт–флюс, відповідно до категорії суднобудівної сталі, що зварюється. На перший погляд задача виглядає доволі простою, оскільки Правила КТ дають однозначні рекомен-

дації [7, 8]. Наприклад, для сталей категорій D32 – D40 оптимальними категоріями зварювальних матеріалів відповідно є 3Y – 3Y40, а для сталей E32 – E40 є 4Y – 4Y40. Однак, в даному конкретному випадку, на практиці відбувається конфлікт інтересів виробників листового прокату та зварювальних матеріалів. З однієї сторони, виробники суднобудівної сталі для сертифікаційних випробувань використовують плавку з максимально високими властивостями, щоб гарантовано забезпечити позитивний результат. З іншої сторони, сертифіковані зварювальні матеріали, як правило, мають незначний запас за заявленими характеристиками міцності та пластичності, що забезпечує їм конкурентну позицію на ринку зварювальних матеріалів. Важливим, також, являється той факт, що сертифікація комбінацій зварювальних матеріалів відбувається в інтервалі погонної енергії 1,8...2,2 кДж/мм, що регламентовано стандартом ДСТУ EN ISO 14171 з класифікацією А на їх виробництво, основні положення якого враховано в Правилах КТ. Таким чином, не може бути повної впевненості в тому, що при зварюванні з погонною енергією 5,0 кДж/мм наплавлений метал гарантовано вийде на заявлені показники своєї категорії. Адже відомо, що збільшення погонної енергії зварювання, особливо до критичних максимальних величин, може суттєво впливати на механічні властивості металу шва, насамперед на показники його ударної в'язкості при від'ємних температурах [3, 9]. У цьому зв'язку, в роботі було поставлено за мету дослідити вплив погонної енергії зварювання на ударну в'язкість наплавленого металу, та, залежно від отриманих результатів, сформулювати рекомендації щодо вибору зварювальних матеріалів для контрольного зварювання при сертифікації виробництва листового прокату зі суднобудівних сталей підвищеної міцності.

Методика досліджень. В основу сертифікаційних випробувань закладено жорсткі вимоги стосовно забезпечення стабільності погонної енергії при зварюванні, що реалізується за рахунок поточного контролю та підтримки основних параметрів технологічного процесу: зварювального струму ($I_{зв}$), напруги дуги (U_d) та швидкості зварювання ($V_{зв}$). Швидкість автоматичного зварювання на практиці підтримується з високою стабільністю. Основні труднощі пов'язані з кількісною оцінкою та підтримкою стабільності зварювального струму та напруги дуги, які є динамічними характеристиками процесу горіння дуги та перенесення електродного матеріалу. У цьому зв'язку, для автоматичного зварювання під флюсом було обрано інверторний комплекс АСТ 1000, виробництва ТОВ «АМІТІ» (м. Миколаїв), з ори-

гінальною авторською системою автоматичного регулювання. Для оцінки коректності розрахунків погонної енергії на підставі показань приладів, було виконано експериментальне осцилографування параметрів процесу зварювання ($I_{зв}$ та U_d), з їх подальшою статистичною обробкою системою IMS v3.1. Коректність розрахунків оцінювалась як похибка між даними приладів та даними осцилограм. Стабільність погонної енергії зварювання у часі оцінювали значеннями коефіцієнтів варіації $I_{зв}$ та U_d .

Калібрування приладів показало, що для погонної енергії 1,5 кДж/мм похибка розрахунку погонної енергії не перевищує 4,2 %, коефіцієнт варіації стабілізації струму 0,022, коефіцієнт варіації стабілізації напруги 0,079; для погонної енергії 5,0 кДж/мм похибка розрахунку не перевищує 3,1 %, коефіцієнт варіації стабілізації струму 0,017, коефіцієнт варіації стабілізації напруги 0,06. Отриманий результат задовольняє найбільш жорстким вимогам нормативних документів КТ, які встановлюють похибку для мінімальної розрахункової погонної енергії не більше $\pm 6,5$ %, а для максимальної не більше ± 4 % [6].

В якості основного матеріалу для випробувань було взято сертифікований листовий прокат із сталей категорії D36 та E36. Відповідно до вимог нормативних документів КТ [5, 6], габаритні розміри контрольних зварних з'єднань становили 2000×400 мм, завтовшки 50 мм для сталі D36 та 30 мм для сталі E36. Для товщини 50 мм виконували К-подібну підготовку кромки (2.5.5 за ДСТУ EN ISO 9692-2), а для 30 мм – 1/2V (2.4.9 за ДСТУ EN ISO 9692-2), таким чином, щоб одна сторона залишалася перпендикулярною до поверхні прокату. Для зварювання сталі D36 використовували сертифіковану комбінацію зварювальних матеріалів – дрiт ОК Autrod 12.20 (S)/флюс ОК Flux 10.71, для сталі E36 – дрiт ОК Autrod 12.22 (S)/флюс ОК Flux 10.71, виробництва ESAB SP. Z.O.O, які мають відповідно категорії 3YM та 4Y40M, індекс водню H5 [10].

Погонну енергію при тестовому зварюванні умовно поділяють на два діапазони: мінімальної (1,5...3,0 кДж/мм) та максимальної (4,0...5,0 кДж/мм) погонної енергії [5, 6]. У цьому зв'язку, для отримання інформації щодо механічних властивостей зварних з'єднань в усьому діапазоні значень, в роботі виконували зварювання на погонних енергіях ($Q_{зв}$) 1,5; 2,5; 4,2 та 5,0 кДж/мм. Для погонної енергії 1,5 кДж/мм використовували дрiт діаметром 3 мм, решта – 4 мм. Погонну енергію обчислювали відповідно до настанов ДСТУ ISO/TR 18491, номер формули (1), термічний коефіцієнт $k=1$ (ДСТУ ISO/TR 17671-1) та регулювали зміною параметрів режимів зварю-



Рис. 1. Зовнішній вигляд контрольних зварних з'єднань до (а) та після (б) зварювання

вання в межах: $I_{зв} = 400...800$ А; $U_{д} = 26...34$ В; $V_{зв} = 41,5...31,0$ см/хв. Попередній підігрів, залежно від хімічного складу та товщини прокату, що підлягав зварюванню, був до $70...100$ °С. Зварювання виконували в нижньому просторовому положенні (РА за ДСТУ ISO 6947). Міжвалікова температура у всіх випадках не перевищувала 150 °С. Зовнішній вигляд контрольних зварних з'єднань до та після зварювання показано на рис. 1.

Після зварювання контрольні з'єднання проходили неруйнівний контроль відповідно вимог стандартів ДСТУ EN ISO 17637 (ДСТУ EN ISO 5817, рівень якості В), ДСТУ EN ISO 11666, рівень прийнятності 2, ДСТУ EN ISO 3452-1 та Правил КТ [7, 8]. Програму механічних випробувань складала відповідно до вимог нормативних документів КТ, які регламентують порядок сертифікації виробництва листового прокату зі суднобудівних сталей підвищеної міцності [5, 6]. В цьому зв'язку, із кожного зварного з'єднання відбиралися зразки для наступних випробувань: поперечний розтяг (повна товщина) – 1 шт. (ДСТУ EN ISO 4136), поперечний згин (повна товщина бокової поверхні) – 4 шт. (ДСТУ EN ISO 5173), макроструктура – 1 шт. (ДСТУ EN ISO 17639), твердість за Віккерсом – 1 шт. (ДСТУ EN ISO 9015-1), ударний згин – 12 шт. (ДСТУ EN ISO 9016). На рис. 2, на прикладі макроструктури зварних з'єднань сталі Е36 завтовшки 30 мм, позначена зона А, з якої відбиралися зразки для випробувань на

ударний згин. Відбір зразків здійснювали з лицьової сторони шва, з зони максимального термічного навантаження, таким чином, щоб відстань від поверхні не перевищувала 2 мм. Виготовлялось чотири комплекти, по три зразки в кожному. Гострі надрізи бокової поверхні – V по Шарпі, виконувались із сторони прямої кромки по металу шва, лінії сплавлення та в ЗТВ на відстані 2 та 5 мм від лінії сплавлення. Надріз по металу шва виконували таким чином, щоб він проходив по центру наплавленого металу останнього лицьового проходу. Випробування проводили в лабораторії Об'єднання «Суднобудівний учбовий центр зварювальної техніки» (м. Миколаїв), яка акредитована Bureau Veritas та має сертифікат відповідності SMS. LAB.320/134467/02/A.0.

Результати експериментів та їх аналіз. Зразки виготовлялись безпосередньо після зварювання контрольних зварних з'єднань відповідно програми випробувань. Результати досліджень, що визначали міцність на розрив зварних з'єднань сталі D36 та E36, з використанням зварювальних матеріалів категорії 3Y та 4Y40 відповідно, наведено в таблиці. Аналіз отриманих результатів показав, що міцність зварних з'єднань, у всіх випадках, знаходилась на рівні базових показників основного металу (руйнування за основним металом). Прямими методами досліджень міцність наплавленого металу не визначалась, однак, опосередковано, через заміри твердості за Віккерсом,

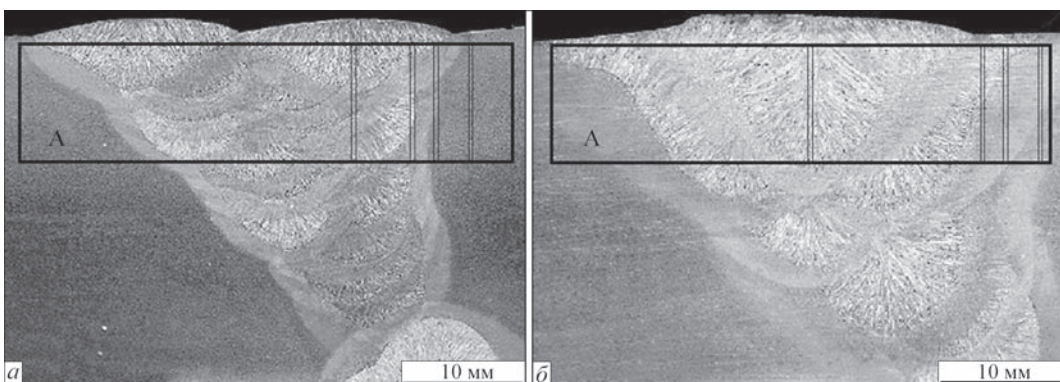


Рис. 2. Макроструктура зварних з'єднань сталі Е36: а – $Q_{зв} = 1,5$ кДж/мм; б – 5,0

Таблиця. Механічні властивості зварних з'єднань

| Категорія сталі (товщина, мм) | Категорія зварювальних матеріалів | Погонна енергія зварювання ($Q_{зв}$), кДж/мм | Міцність на розрив (R_m), Н/мм ² | Середні значення роботи удару KV , Дж | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|-----------|-------------------------|-----------|-----------|
| | | | | Температура випробувань, °С | Метал шва | Лінія сплавлення (Л.С.) | Л.С. 2 мм | Л.С. 5 мм |
| D36 (50) | 3У | 1,5 | 514 | -20 | 67 | 141 | 166 | 172 |
| E36 (30) | 4У40 | 1,5 | 507 | -40 | 87 | 173 | 195 | 170 |
| D36 (50) | 3У | 2,5 | 513 | -20 | 49 | 121 | 189 | 144 |
| E36 (30) | 4У40 | 2,5 | 508 | -40 | 51 | 143 | 201 | 155 |
| D36 (50) | 3У | 4,2 | 516 | -20 | 34 | 87 | 176 | 162 |
| E36 (30) | 4У40 | 4,2 | 505 | -40 | 36 | 92 | 165 | 203 |
| D36 (50) | 3У | 5,0 | 515 | -20 | 21 | 98 | 156 | 190 |
| E36 (30) | 4У40 | 5,0 | 509 | -40 | 16 | 68 | 188 | 175 |

встановлено, що твердість наплавленого металу категорії 3У, в усьому діапазоні значень погонних енергій, залишалась практично постійною та складала 191...201 HV5, а для наплавленого металу категорії 4У40 – 196...204 HV5. Таким чином, було підтверджено стабільність характеристик міцності зварних з'єднань та наплавленого металу у наведених комбінаціях в діапазоні погонних енергій 1,5...5,0 кДж/мм [3, 4].

Випробування поперечних зразків на згин бокової поверхні шва, по два зразки вздовж та проти напрямку зварювання для кожного контрольного з'єднання, при співвідношенні діаметру оправки до товщини 4:1, показало, що всі зразки витримують згин на 180° без руйнування та утворення неприпустимих дефектів. Таким чином, було підтверджено, що збільшення погонної енергії від 1,5 до 5,0 кДж/мм не впливає на пластичність зварних з'єднань суднобудівних сталей підвищеної міцності в межах нормативних вимог [3, 7].

Протилежний вплив надає збільшення погонної енергії на ударну в'язкість наплавленого металу та ЗТВ, особливо її високотемпературної складової. В таблиці наведено середні показники роботи удару різних ділянок зварних з'єднань, а на рис. 3 проілюстровано залежність середньої роботи удару металу шва від погонної енергії зварювання. Аналіз отриманих результатів показав, що погонна енергія зварювання суттєво впливає на роботу удару металу, що наплавляється. В інтервалі мінімальних погонних енергій, при переході від 1,5 та 2,5 кДж/мм середні показники роботи удару зменшуються, але впевнено перевищують мінімальні вимоги Правил КТ до наплавленого металу, які складають 34 Дж при -20 °С для категорії 3У та 39 Дж при -40 °С для категорії 4У40 [7, 8]. В інтервалі максимальних погонних енергій, при 4,2 кДж/мм спостерігається досягнення (категорія 3У) або незначне зменшення (категорія 4У40) середньої роботи удару від нормативних показників, а при 5,0 кДж/мм обидві категорії зварювальних матеріалів демонструють показники ударної в'язкості значно нижче нормативних. Таким чином, було підтверджено,

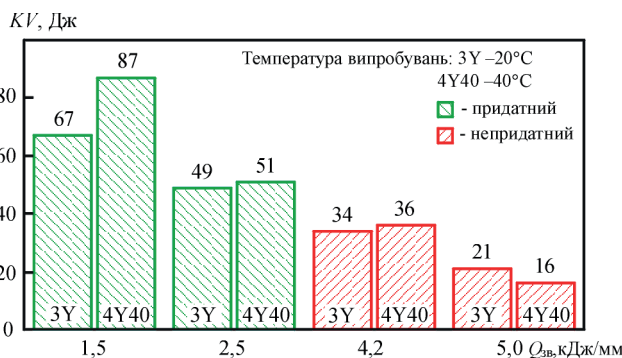


Рис. 3. Залежність середньої роботи удару металу шва (KV) від погонної енергії зварювання ($Q_{зв}$); температура випробувань: 3У -20 °С; 4У40 -40 °С

що збільшення погонної енергії зварювання до 5,0 кДж/мм супроводжується суттєвим зменшенням ударної в'язкості наплавленого металу [11].

При зварюванні під флюсом суднобудівних сталей підвищеної міцності існує велика кількість металургійних та технологічних факторів, за допомогою яких можна регулювати структуру та властивості металу, що наплавляється. Але основним чинником, який впливає на ударну в'язкість металу шва сталого хімічного складу, є його макро-мікроструктура, яка напряму залежить від погонної енергії (геометрії швів) [11]. У нашому випадку, при збільшенні погонної енергії до максимальних величин, висота зварювальних проходів збільшується в середньому в 2,6 рази, ширина – в 1,6 рази. Це призводить до того, що надріз на зразках для визначення роботи удару металу шва виконується в межах одного зварювального проходу (див. рис. 2, б), що є негативним чинником.

На рис. 4 показана макроструктура металу швів залежно від впливу погонної енергії. Аналіз макроструктури показав, що при збільшенні погонної енергії відбуваються класичні процеси: зменшується кількість проходів на умовну одиницю об'єму шва та кількість дрібнозернистої структури повторного нагріву, збільшується довжина дендритів та їх міжосьова відстань, змінюється розмір, склад, локальна концентрація включень тощо [11]. Наведені процеси призводять до утворення грубої структури кристалізації при зварюванні на

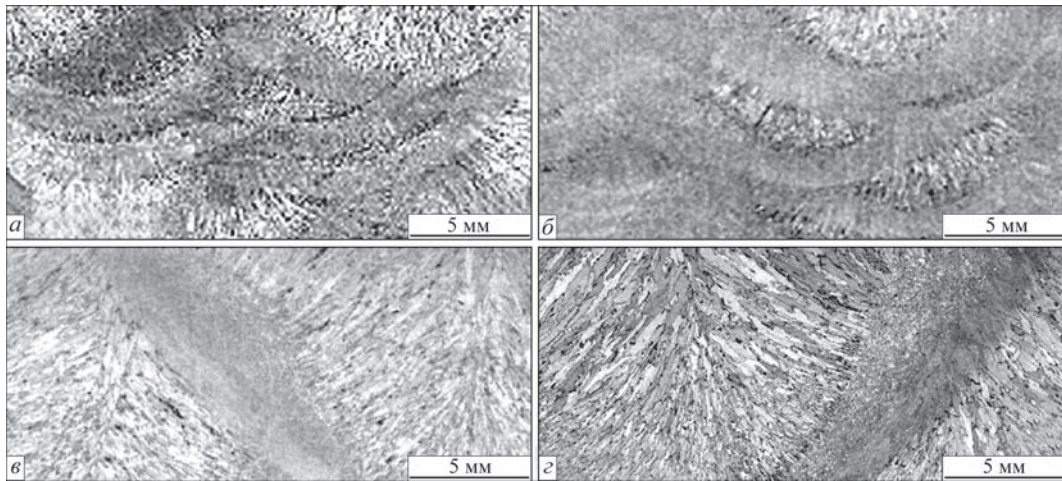


Рис. 4. Макроструктура наплавленого металу (рис. 2, зона А): а – $Q_{зв} = 1,5$ кДж/мм; б – 2,5; в – 4,2; г – 5,0

максимальних погонних енергіях, що викликає значну анізотропію властивостей в межах одного зварювального проходу та негативно впливає на ударну в'язкість металу шва.

При сертифікаційних випробуваннях зварюваності сталей робота удару металу шва має факультативне значення [5]. Вирішальними є показники лінії сплавлення та ЗТВ. Зрозуміло, що показники лінії сплавлення складаються з властивостей високотемпературної ділянки ЗТВ та металу шва. У цьому зв'язку, незадовільні властивості металу шва, при зварюванні на максимальних погонних енергіях, негативно впливають на показники лінії сплавлення (див. таблицю), що, в окремих випадках, може призвести до розширення обсягу сертифікаційних випробувань або їх повної зупинки. Ситуація стає складнішою, якщо потрібно виконувати випробування високотемпературної ділянки ЗТВ сталі на тріщиностійкість (в'язкість руйнування) при статичному навантаженні (СТОД-тест). У такому випадку бажано, щоб зварювальні матеріали гарантовано забезпечували нормативні показники роботи удару металу шва та додатково проходили випробування на тріщиностійкість, хоча остання вимога, на жаль, не є обов'язковою при їх сертифікації. У цьому зв'язку, такі дослідження потрібно виконувати при підготовці до сертифікаційних випробувань в рамках схвалення технологічних процесів зварювання представниками КТ.

Оптимальним варіантом, який гарантовано підвищує властивості металу шва, при фіксованій погонній енергії, є заміна його хімічного складу, що можливо за рахунок призначення зварювальних матеріалів більш високої категорії за температурою експлуатації. Правила КТ в цілому обмежують цю можливість, але, за умови надання конструкції статусу особливо відповідальної, дозволяється призначати категорію на одну вище за оптимальну [7, 8]. В нашому випадку 4Y замість 3Y та 5Y40 замість 4Y40.

У цьому зв'язку, було виконане зварювання контрольних з'єднань на максимальних погонних енергіях, з використанням комбінації дрот Union S 2 Ni 2,5/флюс UV 421 TT, виробництва Voestalpine Böhler Welding, які мають категорію 5Y40M, індекс водню H10 [10]. Метал шва гарантовано перевищив мінімальні нормативні показники роботи удару (39 Дж), які належні для сертифікаційних випробувань сталі відповідного класу міцності, категорійна температура експлуатації якої складає -40 °C, що підтвердило ефективність такого підходу.

Висновки

1. Міцність на розрив зварних з'єднань (R_m) суднобудівних сталей підвищеної міцності та їх пластичність, а також твердість металу шва ($HV5$) не залежать від погонної енергії зварювання в інтервалі значень 1,5...5,0 кДж/мм.

2. Робота удару (KV) металу шва, при збільшенні погонної енергії зварювання в інтервалі 1,5...5,0 кДж/мм зменшується, що пов'язано з утворенням грубої структури кристалізації. На максимальній погонній енергії сертифіковані зварювальні матеріали категорій 3Y та 4Y40 не забезпечують заявлені категорійні показники роботи удару.

3. Підвищення показників роботи удару металу шва можливе за рахунок призначення більш високої категорії зварювальних матеріалів за температурою експлуатації, наприклад, 4Y замість 3Y або 5Y40 замість 4Y40.

Список літератури/References

1. Zhu, H. (2019) Effect of Heat Input on Weld Structure and Mechanical Properties of Marine Engineering Steel. *Journal of Coastal Research*, 94, 352–356.
2. Liu, D., Yang, J., Zhang, Y. et al. (2021) Effect of Welding Heat Input on the Microstructure and Impact Toughness of HAZ in 420 MPa-Grade Offshore Engineering Steel. *Frontiers in Materials*, 8, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.694586>
3. Kostin, A.M., Martynenko, V.A. (2017) Analytical and Practical Assessment of Higher Strength Hot-rolled Plate Weldability. *The Annals of «Dunarea de Jos» University of Galati, Fascicle XII Welding Equipment and Technology*, 28, 45–50.

4. Kostin, O., Martynenko, V., Vakhonina, L. (2022) Integrated Assessment of Weldability of Steel with Increased Strength. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 26(2), 9–15.
5. *Approval of the Manufacturing Process of Metallic Materials, January 2021*. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr480-approval-manufacturing-process-metallic-materials>
6. *Guidelines for Qualification of Welding Procedures, Welders and Weldability, December 2020*. <https://www.lr.org/en/materials-and-qualification-procedures-for-ships/book-a/>
7. *Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials, July 2022*. <https://www.lr.org/en/rules-for-the-manufacture-testing-and-certification-of-materials/>
8. *Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units – Edition, July 2022*. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr216-rules-materials-and-welding-classification-marine-units>
9. Zhiqiang, S., Yanchang, Q., Hongjun, X. et al. (2015) Effects of Large Heat Input on Microstructure and Toughness of E36 Steel Weld Metals with Submerged Arc Welding. *Materials Science and Technology*, 6, 7–11.
10. *Approved welding consumables for use in ship construction / AWCD 03 Submerged arc welding, January 2023*. <https://www.lr.org/en/materials-equipment-components-product-certification/welding-certification-services/>
11. Ali Rizvi, S., Ahamad, M. (2018) Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of a Welded joint-A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(6), 184–188.

RECOMMENDATIONS ON WELDABILITY TESTING AT CERTIFICATION OF SHIPBUILDING STEEL PRODUCTION

O.M. Kostin

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroiv Ukrainy Ave. 54025, Mykolaiv, Ukraine.

E-mail: kostin.weld@gmail.com

Recommendations on selection of welding consumables for weldability tests at certification of production of rolled sheets from higher-strength shipbuilding steels were elaborated. It is shown that the certified welding consumables do not ensure the claimed category impact toughness values of weld metal at increase of welding heat input up to 5.0 kJ/mm which is related to critical dendrite growth, dependent on thermal impact. In this connection, in order to obtain guaranteed positive results, the control welded joints should be regarded as particularly critical structures, which allows, in keeping with the Classification Society Rules (Lloyd Register – LR, Veritas Bureau – BV, etc.), specifying the use of combinations of welding consumables, being one category higher than the optimal one, for instance, 4Y instead of 3Y or 5Y40 instead of 4Y40. 11 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: production certification, shipbuilding steels, welded joints, welding consumables, weldability tests

Надійшла до редакції 02.01.2023

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No.1 IN THE WORLD

ГІГІЄНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНІТНИХ ПОЛІВ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

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

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

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: olgapaton60@ukr.net

Визначено рівні та спектральний склад магнітних полів, що створюються обладнанням дугового зварювання різними способами, з метою оцінювання їх впливу на організм зварників. Виконано аналіз літературних даних щодо електромагнітної безпеки електродугового зварювання. Наведено опис запропонованих методичних підходів до визначення рівнів магнітних полів, засобів їх вимірювань та методів оцінки їх впливу на організм зварника. Охарактеризовано сучасні нормативи щодо оцінки дії електромагнітного поля на людину, їх відмінність від нормативів, що діяли раніше. Показано, що останнім часом почали з'являтися нові публікації про шкідливість електромагнітних полів при використанні електричного виробничого обладнання. Тому виникла необхідність у проведенні нових досліджень електромагнітних полів, зокрема, їх магнітної складової (напруженості магнітного поля, А/м) при використанні зварювального обладнання. Це необхідно для гігієнічного оцінювання магнітних полів та розроблення відповідних методів і засобів захисту зварників. Для цього необхідно було вибрати прилади нового покоління для визначення напруженості магнітних полів, що створюються саме зварювальним обладнанням. На основі аналізу отриманих осцилограм та спектрограм магнітних полів виконано оцінку їх рівнів при застосуванні різних способів дугового зварювання. Показано, що спектральний склад сигналу магнітного поля визначається, переважно, самим способом зварювання, особливостями горіння дуги і характером переносу електродного металу в дуговому проміжку, а також вихідними параметрами джерел живлення зварювальної дуги. Бібліогр. 10, табл. 5, рис. 3.

Ключові слова: дугове зварювання, електромагнітне поле, напруженість поля, осцилограми, спектрограми, захист зварників

Вступ. Зварювальному виробництву властиво постійне збільшення об'єму застосування електричної та електронної апаратури, експлуатація якої супроводжується генеруванням підвищених рівнів електромагнітних випромінювань [1, 2], шкідливих, і, у певних випадках, небезпечних для організму людини. Тому особлива увага приділяється питанням електромагнітної безпеки виробничого та побутового обладнання, дії електромагнітних полів (ЕМП) на людину [3–5], а також створенню відповідних заходів та засобів захисту від них.

Особливої уваги потребують невирішені питання шкідливого та небезпечного впливу ЕМП на організм зварника [1], оскільки саме зварники – це одна з груп робітників, які піддаються дії ЕМП великої інтенсивності, особливо, коли вони розташовуються близько до зварювального обладнання і при прямому контакті кабелів з їх тілом [2, 6]. В залежності від способу зварювання, виду зварювального обладнання і відстані до нього робітника рівні магнітної складової ЕМП, тобто напруженість магнітних полів (МП), може перевищувати гранично допустимі рівні та можуть бути небезпечними для організму людини.

Основними джерелами МП є сильно навантажені ланцюги, а особливо зварювальний контур. Амплітудне значення напруженості МП на робочому місці зварника залежить від зварювального струму, розмірів і форми зварювального контуру, а також від

відстані між робочим і джерелом поля [7]. Робота електричного обладнання для дугового зварювання супроводжується генеруванням МП високих рівнів, переважно, у наднизькому діапазоні частот [6], що створює певну небезпеку для зварників. Так, у роботі [2] представлено результати вимірювань рівнів МП на робочому місці зварювання методом МАГ (металевим електродом в активному газі) відповідно з діючою європейською Директивою 2013/35/ЄС [3]. Отримані результати рівнів МП у смузі частот від 5 Гц до 400 кГц показали, що вони суттєво перевищують рівні МП, що створюються іншими видами електричного обладнання. Це пояснюється тим, що при дуговому зварюванні застосовуються відносно високі електричні струми (до кількох сотень ампер). У роботі [2] для досліджень впливу МП на зварника вимірювали його рівень на робочих місцях за допомогою трьохосового магнітометра Холла, прикріпленого до зап'ястя руки зварника, тобто у найближчому положенні до джерела МП (біля кабелю джерела струму). Результати вимірювань показали, що магнітна індукція МП у цій точці становила 1,49 мТл, що дещо нижче гранично допустимого рівня (ГДР) за нормативами ДСН 3.36.096-2002 [8] (1,75 мТл для восьмигодинної робочої зміни).

Слід зауважити, що старі санітарні норми [9], що діяли до 2002 р., регламентували МП тільки на частоті 50 Гц. Нові ж українські норми [8] враховують весь діапазон частот, характерний для

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

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

зварювальних процесів, і всі необхідні чинники: частоту, напруженість і час дії МП на організм людини. Це дає можливість дати їх об'єктивну гігієнічну оцінку на організм людини.

Попередні публікації про МП були отримані за застарілими методиками і не дають адекватного уявлення про дію МП. Зараз почали з'являтися деякі нові публікації про шкідливість ЕМП при використанні побутової техніки і відсутні дані про ЕМП при зварюванні. Це пояснюється відсутністю відповідних приладів, які б дозволили фіксувати рівні магнітного поля, характерні саме для зварювального обладнання (не на рівні мкТл, а, переважно, на рівні мТл). Тому виникла необхідність у проведенні нових досліджень МП (напруженості магнітного поля, А/м) при використанні як існуючого, так і нового зварювального обладнання. Такі дослідження необхідно виконати в широких діапазонах частот на робочих місцях при застосуванні різних видів зварювання. При цьому слід врахувати вплив на рівень і частоту МП особливостей способів зварювання, відстані робочого місця зварника до джерела МП і час його перебування в зоні небезпечної дії. Такі дані необхідні для розроблення методів і засобів захисту від МП.

Метою даної роботи є дослідження напруженості магнітних полів при різних способах дугового зварювання для їх гігієнічного оцінювання у відповідності з новими нормативами.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити оптимальні умови проведення експериментів щодо визначення напруженості МП, що створюються зварювальним обладнанням;
- визначити допустимий час роботи зварника в зоні з підвищеним рівнем МП;
- дати гігієнічну оцінку МП у відповідності з новими нормативами для подальшого розроблення рекомендацій із захисту зварників від МП.

Методика досліджень. Оцінка параметрів МП на робочому місці зварників виконувалась у такій послідовності:

- визначення зони можливого знаходження працюючого біля електричного обладнання під час проходження зварювального струму;
- виділення в цій зоні точок максимально наближених до джерела МП;
- визначення частотних діапазонів випромінювань і вимірювання напруженості МП в цих точках і діапазонах;
- визначення часових характеристик МП.

Вимірювання напруженості МП при дугових методах зварювання повинні проводитися з урахуванням розміщення електричного кабелю.

Для вимірювання напруженості МП використовували виносний датчик (перетворювач магнітного поля), інтегруючий RC-ланцюг і реєструючий пристрій, в якості якого використовували цифровий запам'ятовуючий осцилограф з функ-

цією швидкого перетворювання Фур'є (ШПФ) з блоком розширення. Застосовували такі прилади:

- датчик магнітного поля ДМП-1 (Україна);
- вимірювач індукції магнітного поля ГФИ-1 (Україна);
- вимірювач індукції магнітного поля ТП2-2У-01 (Україна);
- осцилограф PCS-500 з ПК (Velleman, Бельгія);
- осцилограф цифровий запам'ятовуючий ТДС 1002 (Tektronix, США).

У процесі вимірювань напруженості МП датчик вносили в поле, що досліджувалось, і орієнтували в просторі по максимуму показів реєструючого приладу. Виконували три виміри у вигляді коротких імпульсів з великим періодом тривалості. При цьому датчик розташовували послідовно в трьох взаємноперпендикулярних площинах і реєстрували його показання в кожній площині. Амплітудне значення вектора напруженості МП визначали за формулою [8]:

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

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

Сумарне значення магнітного поля H визначали за виразом [8]:

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

де H_n – напруженість магнітного поля окремої гармоніки.

Тривалість опромінення працюючих в період зміни визначали шляхом проведення хронометражних спостережень. Сума всього часу, затраченого на виконання зварювання, показує час опромінення протягом дня.

Досліди виконувались у зварювальних лабораторіях Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона на типових робочих місцях. Вимірювання напруженості МП проводилися при ручних, автоматичних і напівавтоматичних способах дугового зварювання при застосуванні постійного та змінного струму. На робочій поверхні металевого стола встановлювались деталі для зварювання. Розташування зварювального обладнання (джерела живлення, баластних реостатів, сталевих газових балонів тощо) було незалежно-оптимальним. У зв'язку з вільним розташуванням джерел живлення і баластних реостатів зварювальні кабелі також мали вільне положення в просторі і відносно зварника.

Основною задачею вимірювання напруженості МП є порівняння її з сучасними санітарними нормами [8]. При цьому розсіювання МП від джерел живлення, магнітні наводки від сусідніх постів і вплив феромагнітних мас, що мають великий вплив на вимірювання, на цьому етапі досліджень не мали принципового значення. Це обумовлено тим, що при ручному зварюванні рівень МП, що індукуються на

поверхні різних частин тіла зварника та в середині визначається переважно величиною зварювального струму. Крім того, на рівень МП суттєво впливає площа випромінюючого контуру, розташування зварників відносно основних джерел випромінювання і відстань від випромінювача до тіла зварника.

Схема розташування зон, в яких проводилися вимірювання при ручному і напівавтоматичному зварюванні, представлена на рис. 1.

Наведений опис умов проведення дослідів дозволяє коректно виміряти рівні МП у всіх чутливих точках організму людини, які можуть піддаватися небезпечній та шкідливій дії МП. До таких точок, переважно, належать точки, позначені на рис. 1: 1 – головний мозок; 2 – серце й легені (груди); 3 – сечостатеві органи (живіт); 4 – кисть руки. Оскільки електричний кабель може дотикатися до тіла зварника, на ньому також необхідно визначати напруженість МП.

Оцінка отриманих результатів вимірювань напруженості МП виконувалася шляхом їх порівняння з нормативними значеннями ГДР [8], для чого необхідно було знати час знаходження (експозиції) зварника в цих полях. Для цього проводили хронометраж конкретного технологічного процесу, який міг бути здійсненим в реальних умовах промислового виробництва. Проте раніше виконані дослідження зайнятості зварників показують, що дія МП на організм носить перервний характер. Так, персонал ручного дугового зварювання в цілому на протязі восьмигодинної робочої зміни

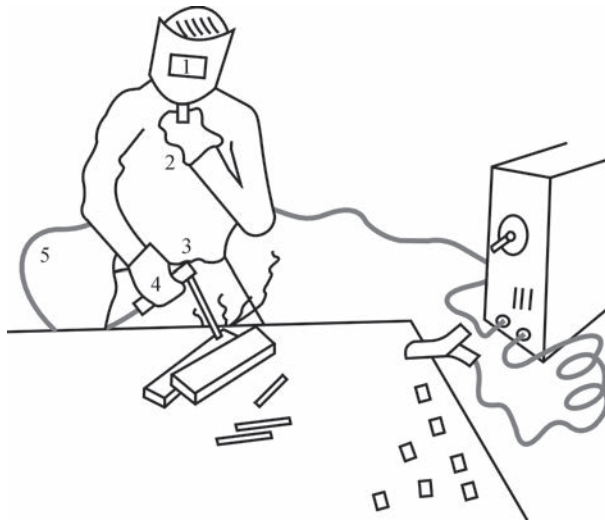


Рис. 1. Схема розташування зон вимірювання напруженості магнітного поля: 1 – голова (лоб); 2 – груди; 3 – живіт; 4 – кисть; 5 – кабель

Таблиця 1. Вимоги до рівнів магнітного поля згідно ДСН 3.3.6.096-2002 [8]

| Параметри | Граничні амплітудні значення в спектральних діапазонах | | |
|---|--|------------------|----------------|
| | 0...5 Гц | 5...50 Гц | 0,05...1,0 кГц |
| $E H_{H_{гд}}$, (А/м) ² · год | $1,4 \cdot 10^8$ | $1,6 \cdot 10^7$ | 70000 |
| $H_{гд}$, (А/м) на 2 год | 11832 | 2828 | 187 |

Примітка: $H_{гд} = \sqrt{\frac{E H_{H_{гд}}}{T}}$, де $E H_{H_{гд}}$ – гранично допустиме значення енергетичного навантаження протягом робочого дня; T – час дії, год.

знаходиться в зоні несприятливої дії МП не більше двох годин, що обумовлено необхідністю виконання підготовчих робіт і коефіцієнтом тривалості увімкнення зварювального обладнання (ПВ, %). Зазвичай для обладнання ручного дугового і напівавтоматичного зварювання він складає 20...60 % від п'ятихвилинного циклу роботи.

Отже, якщо прийняти за чистий час зварювання 2 год за зміну, значення нормованих параметрів згідно санітарних норм будуть мати значення, наведені в табл. 1.

Такі умови виконання експериментальних замірів напруженості МП, тобто чистий час зварювання, що становить 2 год за зміну, дозволяє об'єктивно визначити реальні значення ГДР МП.

Результати експериментів та їх аналіз. Виконано дослідження напруженості МП при дуговому зварюванні різними способами (автоматичному зварюванні під флюсом, ручному покритими електродами, напівавтоматичному в захисних газах) електричним струмом промислової частоти (50 Гц) та постійним струмом. Умови проведення експериментів (способи зварювання, марка зварювальних матеріалів та обладнання, режими зварювання), а також результати визначення напруженості МП наведено в табл. 2–5.

Результати визначення напруженості МП при автоматичному зварюванні під флюсом з використанням тиристорного трансформатора з фазовим управлінням ТДФ-1002 виконувалися методом аналізу осцилограми та спектрограми, отриманих за допомогою зазначених приладів. Вимірювання проводилися на відстані 0,5 м від осі зварювального мундштука автомата ТС-17. Магнітне поле, індуковане зварювальним струмом, на екрані осцилографа візуально сприймається як синусоїдальне (рис. 2). Однак його дискретний спектр (рис. 3) характеризується як вираженою переважно правою гармонікою з частотою 50 Гц (H_{m50}), що досягає максимальної величини в ділянці живота зварника $H_{m50} = 360$ А/м, так і гармоніками $H_{m100} = 180$ і $H_{m150} = 150$ А/м. Отримані результати вимірювань (табл. 2) порівнювали з нормативними величинами МП.

Таким чином, результати визначення рівнів МП при автоматичному зварюванні на змінному струмі під флюсом на середньому за потужністю режимі показали задовільні в гігієнічному відношенні результати (табл. 2). Із результатів таблиці

видно, що перевищень ГДР МП в усіх досліджених діапазонах частот не виявлено.

При цьому було враховано, що оператор автоматичного зварювання не зобов'язаний постійно знаходитися в зоні впливу МП, тобто може захищатися відстанню від зварювального обладнання, мінімізуючи шкідливу дію МП на організм.

Діюче значення магнітного поля H , підраховане за виразом (2), становить 404 А/м, що значно нижче регламентованих (1400 А/м).

Подальша перевірка згідно ДСН 3.3.6.096-2002 складається з перевірки балансу енергетичного навантаження за діапазонами частот і перевищення норми в діапазоні 0...1000 Гц за виразом [8]:

$$\sum H_n^2 / \text{ГДР}^2 \leq 1, \quad (3)$$

де ГДР – гранично допустимі рівні МП відповідних діапазонів.

Так, для найбільших напруженостей МП, у даному випадку в ділянці живота зварника, при двогодинній експозиції величина співвідношення (3) більша одиниці. Отже, у цій зоні при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом є перевищення допустимих значень напруженості МП, що вимагає застосовувати заходи захисту зварника (в даному випадку оператора автоматичного зварювання).

Перевищення допустимого рівня МП у розглянутому випадку обумовлене несинусоїдальною формою зварювального струму та наявністю у спектрі другої і третьої гармонік МП $H_{m100} = 180$ та $H_{m150} = 150$ А/м.

Зрозуміло, що в цьому випадку для оператора-зварника немає необхідності знаходитися в зазначеній зоні і можна застосувати так званий за-

хист відстанню. В інших випадках, наприклад, для ручного та напівавтоматичного зварювання, питання захисту зварника від МП буде складнішим.

Аналогічним чином було виконано аналіз осцилограм і спектрограм, характерних для інших способів дугового зварювання (табл. 3–5).

Результати досліджень рівнів МП (табл. 3) при ручному дуговому зварюванні покритими електродами марки АНО-21 на оптимальному режимі показали, що в частотному діапазоні 0...5 Гц перевищень нормованих рівнів МП немає. У частотному діапазоні 5...50 Гц перевищень також немає: усі значення напруженості МП нижчі ГДР двогодинної і навіть восьмигодинної експозиції. Але напруженість МП біля самого кабелю (струмоводу), який з'єднує випрямляч зварювального струму ВДУ-506 з електродотримачем, в частотному діапазоні 0...5 Гц по всій довжині кабелю становить 3977 А/м. Тобто напруженість у цій зоні майже досягає ГДР (4200 А/м). А у діапазоні частот 50...1000 Гц, для якого ГДР становить 94 А/м для восьмигодинної робочої зміни, виявлено окремі гармоніки $H_{300} = 896$ А/м та $H_{600} = 179$ А/м, які значно перевищують ГДР. Це свідчить про те, що якщо зварник знаходиться близько біля кабелю (обмотує його навколо свого тіла або намотує на руку, якою тримає електрод), це буде небезпечно для його здоров'я.

Дослідження напруженості МП (табл. 4) при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі дротом Св-08Г2С показали, що в усіх досліджених зонах тіла зварника є перевищення ГДР МП в частотному діапазоні 50...1000 Гц.

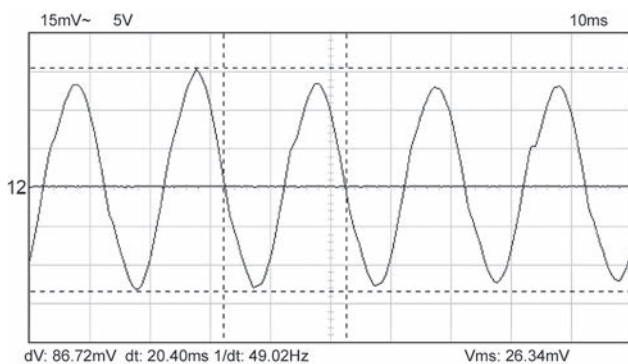


Рис. 2. Осцилограма магнітного поля автоматичного дугового зварювання під флюсом

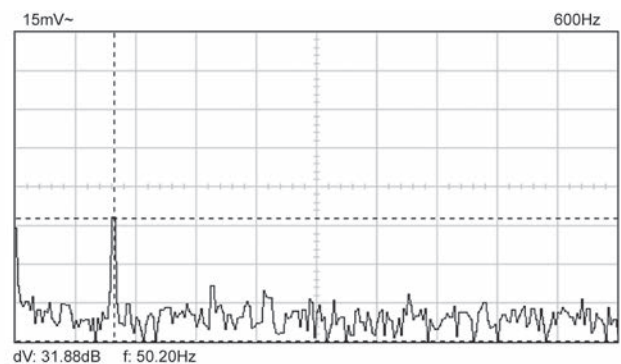


Рис. 3. Спектрограма магнітного поля автоматичного дугового зварювання під флюсом

Таблиця 2. Результати визначення напруженості магнітного поля при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом АН-65 (діаметр дроту 4,0 мм, автомат ТС-17, джерело струму – трансформатор ТДФ-1002, струм – змінний 700 А, 36 В)

| Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_m в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|----------------|-------------|----------------|--|-------------|----------------|------------------------------------|-----------|--------|-----------|------------|--------|---------|
| Зони вимірювань | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 (лоб) | | | 2 (груди) | | | 3 (живіт) | | | 4 (кисть) | | | 5 (кабель) | | |
| Діапазони частот, Гц | | | | | | | | | | | | | | |
| 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0-5 | 5...50 | 50...1000 | 0-5 | 5...50 | 50-1000 |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| $H_5 = 83$ | $H_{50} = 12$ | $H_{100} = 62$ | $H_5 = 130$ | $H_{50} = 210$ | $H_{100} = 98$ $H_{150} = 70$ $H_{200} = 48$ | $H_5 = 230$ | $H_{50} = 360$ | $H_{100} = 180$ $H_{150} = 150$ | * | * | * | * | * | * |

Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено.

Таблиця 3. Результати визначення напруженості магнітного поля при ручному дуговому зварюванні електродами АНО-21 (діаметр електродів 4,0 мм, джерело струму – випрямляч ВДУ-506, струм – постійний 200...220 А, 32...34 В)

| Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|--|-------------|---------------|--|--------------|----------------------------------|--|--------------|----------------|---|--------------|----------------|--|
| Зони вимірювань | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 (лоб) | | | 2 (груди) | | | 3 (живіт) | | | 4 (кисть) | | | 5 (кабель) | | |
| Діапазони частот, Гц | | | | | | | | | | | | | | |
| 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| $H_5 = 397$ | $H_{50} = 28$ | $H_{150} = 20$ $H_{300} = 32$ $H_{600} = 15$ | $H_5 = 658$ | $H_{50} = 40$ | $H_{100} = 49$ $H_{150} = 64$ $H_{250} = 31$ $H_{300} = 82$ $H_{450} = 15$ | $H_5 = 2386$ | $H_{25} = 283$ $H_{50} = 159$ | $H_{100} = 127$ $H_{300} = 710$ $H_{400} = 113$ $H_{500} = 113$ | $H_5 = 1531$ | $H_{50} = 113$ | $H_{100} = 50$ $H_{300} = 357$ $H_{500} = 43$ | $H_5 = 3977$ | $H_{25} = 253$ | $H_{100} = 90$ $H_{150} = 56$ $H_{200} = 63$ $H_{300} = 896$ $H_{350} = 23$ $H_{400} = 25$ $H_{425} = 15$ $H_{500} = 21$ $H_{600} = 179$ |

Наявність такої великої кількості гармонік у цьому частотному діапазоні можна пояснити впливом на форму сигналу МП характеристик самого способу зварювання. Зокрема, на форму сигналу МП впливають особливості горіння дуги, характер переносу електродного металу в дуговому проміжку і, звичайно ж, вихідні параметри джерела живлення зварювальної дуги. Процес зварювання може характеризуватися наявністю коротких замикань дугового проміжку, розміром крапель розплавленого металу та іншими факторами [10], які впливають на частоту створюваного МП.

Результати визначення напруженості МП, що створюється при ручному аргонодуговому зварюванні сталі неплавким електродом в аргоні з використанням випрямляча струму MAGIC WAVE-3000 (Австрія), наведено в табл. 5. Ці результати свідчать про повну відсутність перевищень рівня МП в усіх діапазонах частот і зонах тіла зварника. Це можна пояснити поліпшеними електричними характеристиками зазначеного сучасного випрямляча струму з модуляцією зварювального струму.

Разом з тим, наявність у зоні кисті руки, якою зварник тримає електрод (див. рис. 1), сигналу МП в частотному діапазоні 50...1000 Гц величи-

ною 160 А/м ($H_{320} = 160$) не означає, що є перевищення ГДР. Це пояснюється тим, що згідно санітарних норм у випадку локальної дії МП на кисті рук використовується підвищувальний коефіцієнт:

$$H_{\text{гд.лок}} = 5H_{\text{гд.заг}} \quad (4)$$

де $H_{\text{гд.лок}}$ – ГДР змінного магнітного поля з частотою 50 Гц при локальній дії (кисті рук); $H_{\text{гд.заг}}$ – ГДР змінного магнітного поля при загальній дії [8].

Тому перевищень ГДР у даному випадку немає: ця гармоніка знаходиться значно нижче допустимого рівня 470 А/м, що нижче ГДР. Отже, для ручного аргонодугового зварювання на постійному струмі перевищень нормованих значень МП немає навіть при восьмигодинній експозиції.

Низькі рівні МП у цьому випадку пояснюються використанням постійного струму невеликої сили та низької напруги дуги, а також особливостями випрямляча струму MAGIC WAVE-3000.

Разом з тим, у цих дослідях ручне зварювання неплавким електродом в аргоні виконувалося без присаджувального дроту. В інших же дослідях при подачі присадки в дуговий проміжок за рахунок хвильових процесів можлива додаткова модуляція сигналу МП і ускладнення (за кількістю гармонік) його спектра.

Таблиця 4. Результати визначення напруженості магнітного поля при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі (дріт Св-08Г2С, діаметр – 1,2 мм, джерело струму – випрямляч ВДГ-3-3, струм – постійний 220 А, 20,,22 В)

| Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--|-------------|----------------|---|--------------|----------------|---|-------------|----------------------------------|---|------------|--------|-----------|
| Зони вимірювань | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 (лоб) | | | 2 (груди) | | | 3 (живіт) | | | 4 (кисть) | | | 5 (кабель) | | |
| Діапазони частот, Гц | | | | | | | | | | | | | | |
| 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| $H_5 = 477$ | * | $H_{75} = 318$ $H_{200} = 202$ $H_{300} = 126$ $H_{400} = 51$ $H_{480} = 63$ $H_{600} = 32$ | $H_5 = 560$ | $H_{46} = 356$ | $H_{66} = 226$ $H_{80} = 253$ $H_{210} = 224$ $H_{232} = 126$ $H_{266} = 89$ $H_{276} = 63$ $H_{300} = 561$ $H_{350} = 80$ | $H_5 = 1193$ | $H_{46} = 450$ | $H_{56} = 450$ $H_{114} = 316$ $H_{134} = 201$ $H_{158} = 201$ $H_{178} = 201$ $H_{184} = 201$ $H_{222} = 201$ $H_{300} = 201$ | $H_5 = 768$ | $H_{20} = 127$ $H_{40} = 318$ | $H_{60} = 357$ $H_{120} = 253$ $H_{186} = 253$ $H_{216} = 143$ $H_{242} = 113$ $H_{276} = 113$ $H_{300} = 159$ $H_{350} = 127$ $H_{400} = 63$ $H_{462} = 71$ $H_{520} = 51$ | * | * | * |

Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено.

Таблиця 5. Результати визначення напруженості магнітного поля при ручному дуговому зварюванні неплавким електродом в аргоні (діаметр електрода – 3,0 мм, джерело струму – випрямляч MAGIC WAVE-3000 (Австрія), струм – постійний 100 А, 10 В)

| Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|---|-------------|--------|-----------|-------------|---------------|---|--------------|---------------|--|------------|--------|-----------|
| Зони вимірювань | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 (лоб) | | | 2 (груди) | | | 3 (живіт) | | | 4 (кисть) | | | 5 (кабель) | | |
| Діапазони частот, Гц | | | | | | | | | | | | | | |
| 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 | 0...5 | 5...50 | 50...1000 |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| $H_5 = 416$ | $H_{25} = 33$ | $H_{85} = 45$ $H_{100} = 35$ $H_{115} = 45$ $H_{295} = 20$ | $H_5 = 310$ | * | * | $H_5 = 636$ | $H_{40} = 21$ | $H_{95} = 29$ $H_{160} = 29$ $H_{270} = 40$ $H_{320} = 80$ | $H_5 = 1081$ | $H_{40} = 39$ | $H_{95} = 49$ $H_{160} = 51$ $H_{290} = 71$ $H_{320} = 160$ $H_{550} = 41$ | * | * | * |

Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено.

Отримані результати свідчать про те, що при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі металевим електродом на робочому місці зварника створюються МП, які перевищують ГДР в частотному діапазоні 50...1000 Гц. Це обумовлено, переважно, наявністю у складі індукованих МП досить інтенсивних високочастотних (у порівнянні з частотою 50 Гц) гармонічних сигналів, оскільки норма МП у цьому діапазоні частот згідно регламенту [8] різко зменшується (стає більш жорсткою) приблизно в 15 разів.

Для спектру всіх досліджених зварювальних процесів характерна наявність у сигналах МП складових з основними (першими) гармоніками 20, 50, 60, 300 Гц гармонік, кратних основним частотам і комбінаційним частотам. Походження цих гармонік при дуговому зварюванні можна пояснити наступними особливостями процесу зварювання:

20...25 Гц – це частота короткого замикання дугового проміжку, що виникає під час зварювання металевим електродом у вуглекислому газі;

50 Гц – частота напруги мережі, що живить зварювальний трансформатор, випрямляч, інвертор тощо;

60 Гц – частота напруги у вторинному контурі зарубіжних джерел живлення дуги (наприклад, MAGIC WEVE-2600);

300 Гц – частота першої гармоніки змінної складової випрямленої напруги при використанні шестифазної схеми випрямлення змінного струму.

Слід також врахувати вплив на форму МП наявності присаджувального дроту в усіх наших дослідках, окрім ручного зварювання неплавким електродом в аргоні, який сприяє додатковій модуляції сигналу МП і ускладнює його спектр.

Аналізуючи закономірності перебігу зварювальних процесів, стає зрозумілим, що спектральний склад сигналу МП, генерованих зварювальним обладнанням, переважно, визначається двома принципово нероздільними факторами:

– самим способом зварювання, особливостями горіння дуги і характером переносу електродного металу в дуговому проміжку;

– вихідними параметрами джерел живлення зварювальної дуги: трансформаторів, випрямля-

чів, а також додатковими електричними пристроями, що входять в зварювальний ланцюг (дросель, конденсатори, стабілізатори, осцилятори, «пристрої запалення дуги», баластні реостати тощо).

Природно, що для розробників електричного зварювального обладнання найбільший інтерес становить шлях зниження інтенсивності вищих гармонік за рахунок зменшення впливу другого фактору. Тому, з міркувань електромагнітної безпеки, розробникам такого обладнання слід зменшити крутизну фронту нарощування імпульсів струму і напруги джерел живлення зварювальної дуги, що працюють у ключових режимах. У процесі проектування джерел живлення необхідно знаходити компромісні рішення, вибираючи деякі оптимальні значення робочої частоти перетворювальних пристроїв і форму імпульсів зварювального струму. Що стосується впливу самих способів ручного та напівавтоматичного зварювання на частотний спектр і інтенсивність МП в робочій зоні, на нашу думку, потрібно:

– постійно обмежувати застосування процесів з короткими замиканнями дугового проміжку і ширше застосовувати зварювання в сумішах газів ($Ar + CO_2$, $Ar + O_2$, $Ar + O_2 + CO_2$) дротами малих діаметрів, що забезпечить відсутність цих замикань;

– розглянути (з гігієнічних позицій) можливість застосування способів зварювання і наплавлення з модуляцією режиму зварювання з метою отримання більш стабільного і передбачуваного процесу генерації МП;

– застосовувати автоматизацію та роботизацію зварювальних процесів.

Висновки

1. Визначено необхідні умови вимірювання рівнів МП, які створюються зварювальним обладнанням, для їх коректного гігієнічного оцінювання. Показано, що для об'єктивної оцінки рівнів магнітних полів чистий час зварювання має становити 2 год за зміну.

2. Результати гігієнічної оцінки магнітних полів у відповідності з новими нормативами полягають у наступному:

– напівавтоматичне зварювання металевим електродом у вуглекислому газі характеризується перевищенням гранично допустимого рівня магнітного поля в частотному діапазоні 50...1000 Гц;

– при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом перевищення гранично допустимих рівнів окремих гармонік магнітного поля відсутні, але є перевищення сумарного значення усіх гармонічних складових магнітного поля;

– ручне дугове зварювання постійним струмом неплавким електродом в аргоні характеризується помірним рівнем магнітного поля на робочому місці;

– під час ручного дугового зварювання покритими електродами перевищений рівень магнітного поля має місце лише на самому електродному кабелі.

Для мінімізації шкідливої дії магнітних полів на зварників необхідно керуватись наступними рекомендаціями (наскільки це можливо):

збільшити відстань тіла зварника від джерела електричної енергії і зварювального обладнання;

не давати можливості електродному чи зворотному кабелю обвиватися навколо тіла працюючого;

не давати можливості тілу зварника знаходитися між електродним кабелем і будь-яким іншим електричним кабелем; усі кабелі необхідно тримати разом з однієї чи другої сторони.

Список літератури/References

1. Pačaiová, H., Oravec, M., Šmelko, M. et al. (2018) Extra low frequency magnetic fields of welding machines and personal safety. *Journal of electrical engineering*, 69(6), 493–496. URL: <https://sciendo.com/pdf/10.2478/jee-2018-0084>
2. Michałowska, J., Przystupa, K., Krupski, P. (2020) Empirical assessment of the MAG welder's exposure to an electromagnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny*, 96. <https://doi.org/10.15199/48.2020.12.48>
3. Modenese, A., Gobba, F. (2021) Occupational Exposure to Electromagnetic Fields and Health Surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1730. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041730>
4. Stam, R. (2018) *Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)*. Publication of the National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands. URL: <https://rivm.openrepository.com/bitstream/handle/10029/623629/2018998.pdf?sequence=1>
5. Fuentes, M. A., Trakic, A., Wilson, S. J., Crozier, S. (2008) Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(4), 1355–1364. <https://doi.org/10.1109/TBME.2007.913410>
6. Yamaguchi-Sekino, S., Ojima, J., Sekino, M. et al. (2011) Measuring exposed magnetic fields of welders in working time. *Industrial health*, 49(3), 274–279. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1269>
7. Levchenko, O., Polukarov, Y., Goncharova, O. et al. (2022) Determining patterns in the generation of magnetic fields when using different arc welding techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 10 (116), 50–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254471>
8. *Напруженість електромагнітних полів промислової частоти*. (2002) ДСН 3.3.6.096-2002. Київ, МОЗ, 16. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text>. (2002) ДСН 3.3.6.096-2002 *Intensity of electromagnetic fields of commercial frequency*. Київ, МОЗ, 16. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text> [in Ukrainian].
9. *Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц*. (1986) Москва: № 3206-85 от 17.01.85, 7. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031592>. (1986) *Maximum permissible level of magnetic fields of 50 Hz frequency*. Moscow, No. 3206-85, 17.01.85, 7. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031592>.
10. Потапьевский А.Г. (2007) *Сварка в защитных газах плавающим электродом. Часть 1. Сварка в активных газах*. Изд. 2-е, перераб. Киев, Экотехнология, 192. URL: <https://themechanic.ru/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=13675>. Potapievsky, A.G. (2007) *Consumable electrode shielded-gas welding. Pt 1: Welding in active gases*. 2nd Ed. Kyiv, Ekotekhnologiya. URL: <https://themechanic.ru/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=13675>.

HYGIENIC CHARACTERISTIC OF MAGNETIC FIELDS AT DIFFERENT ARC WELDING METHODS

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

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

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua.

The levels and spectral composition of magnetic fields, generated by equipment for arc welding by different methods were determined, in order to assess their influence on the welder body. Published data on electromagnetic safety of electric arc welding were analyzed. A description of the proposed methodological approaches to determination of magnetic field levels, their measurement methods and methods of assessment of their influence on the welder body is given. Modern standards are characterized as to evaluation of the electromagnetic field impact on man, and their difference from the earlier applied standards. It is shown that new publications began to appear recently, which are devoted to the harmfulness of electromagnetic fields at application of electric production equipment. Hence the need to conduct new studies of electromagnetic fields, in particular their magnetic component (magnetic field intensity, A/m), when using welding equipment. This is required for hygienic assessment of the magnetic fields and development of the respective methods and means of welder protection. For this purpose, it will be necessary to choose new generation instruments for determination of the intensity of the magnetic fields. Proceeding from analysis of the obtained oscillograms and spectrograms of the magnetic fields, evaluation of their levels was performed at application of different arc welding methods. It is shown that the spectral composition of the magnetic field signal is determined, predominantly, by the welding process proper, features of arc burning and mode of electrode metal transfer in the arc gap, as well as output parameters of the welding arc power source. 10 Ref., 5 Tabl., 3 Fig.

Keywords: arc welding, electromagnetic field, field intensity, oscillograms, spectrograms, welder protection

Надійшла до редакції 25.02.2023

ЧИННІ ПАТЕНТИ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАНУ НА КОРИСНІ МОДЕЛІ*

| Номер патенту | Номінальний строк дії (до) | Назва | Автори | Призначення |
|---------------|----------------------------|--|---|--|
| 89041 | 27.10.2023 | КОМПОЗИЦІЙНИЙ АМОРФНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ЦИРКОНІЮ З АНТИФРИКЦІЙНИМ КОМПОНЕНТОМ ДИСУЛЬФІДУ МОЛІБДЕНУ | Астахов Євгеній Аркадійович, Борисов Юрій Сергійович, Кільдій Андрій Іванович, Бурлаченко Олексій Миколайович, Недайборщ Сергій Дмитрович, Щепетов Віталій Володимирович | Продукт призначений для використання як матеріал покриттів для зміцнення та відновлення деталей машин, що працюють при підвищених швидкісно-навантажувальних параметрах, в умовах відсутності мастил чи при їх обмеженнях, а також в агресивних середовищах |
| 94989 | 04.06.2024 | МАШИНА ДЛЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ | Кучук-Яценко Сергій Іванович, Качинський Володимир Станіславович, Галахов Микола Вікторович, Коваль Михайло Павлович, Клименко Володимир Іванович | Машина призначена для пресового зварювання труб в стаціонарних або польових умовах, може використовуватись у різних галузях промисловості та будівництва, при зварюванні трубчастих деталей різноманітного призначення та конфігурації, для виконання монтажних і ремонтних робіт |
| 98364 | 09.11.2024 | ШЛАК ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ НАПЛАВКИ МІДІ | Біктагіров Фаріт Камілович, Шаповалов Віктор Олександрович, Гнатушенко Олександр Віталійович, Ігнатов Анатолій Петрович | Продукт призначений для забезпечення високої якості сплавлення при електрошлаковому процесі |
| 105752 | 12.07.2025 | ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ЗВАРЮВАННЯ НЕРВОВИХ ТКАНИН ТВАРИН І ЛЮДИНИ | Маринський Георгій Сергійович, Васильченко Валерій Андрійович, Чернець Олександр Владиславович, Чвортко Наталія Анатоліївна, Корсак Аліна Вадимівна, Чайковський Юрій Богданович, Ліходієвський Володимир Володимирович, Лопаткіна Катерина Гордіївна, Сидоренко Дмитро Федорович | Електрохірургічний пристрій, що складається з механічного апроксиматора та електрохірургічного біполярного пінцета, призначений для вирішення однієї з найактуальніших проблем хірургії - з'єднання розірваних периферійних нервів кінцівок після їх травматичних ушкоджень та відновлення рухомості кінцівок |
| 107818 | 07.12.2025 | СПОСІБ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ | Нестеренков Володимир Михайлович, Кравчук Леонід Аркадійович, Майстренко Анатолій Львович, Лукаш Володимир Андрійович | Спосіб призначений для електронно-променевого зварювання важко-навантажених конструкцій літальних апаратів, а саме складних об'ємних конструкцій, які виготовляють з високоміцних алюмінієвих сплавів (наприклад, крило літака). Спосіб призначений для електронно-променевого зварювання важко-навантажених конструкцій літальних апаратів, а саме складних об'ємних конструкцій, які виготовляють з високоміцних алюмінієвих сплавів (наприклад, крило літака) |
| 109123 | 28.02.2026 | ІНДУКЦІЙНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРЕНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК | Пантелеймонов Євген Олександрович | Пристрій призначений для термічної обробки зварених стиків залізничних рейок перед загартуванням |

*Перелік чинних патентів на корисні моделі, одноосібним власником яких є Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України станом на 01.01.2023 (матеріал підготувала Ірина Бернадська, к.т.н., патентний повірений України).

| | | | | |
|--------|------------|--|--|---|
| 110764 | 23.03.2026 | КОНСТРУКЦІЯ НАДУВНОЇ (ПНЕВМАТИЧНОЇ) ШИНИ ДЛЯ ТИМЧАСОВОЇ ФІКСАЦІЇ ТАЗОСТЕГНОВОГО ПОЯСУ ТІЛА ЛЮДИНИ | Юрженко Максим Володимирович, Кораб Микола Георгійович, Шадрін Андрій Олександрович, Бур'янов Олександр Анатолійович, Казмірчук Анатолій Петрович, Хоменко Ігор Петрович, Ярмлюк Юрій Олександрович, Савка Ігор Станіславович, Цвіна Сергій Антонович, Вакулич Мирослав Володимирович, Лось Дмитро Володимирович | Пристрій призначений для використання в галузі травматології та ортопедії, для тимчасової фіксації кісток ушкодженого тазостегнового поясу тіла людини при транспортуванні осіб, поранених та/або постраждалих внаслідок військових дій, техногенних катастроф, стихійного лиха та ін., від місця поранення до лікувального закладу |
| 112892 | 23.03.2024 | КОМБІНОВАНА ТРУБА ВИСОКОГО ТИСКУ | Савицький Михайло Михайлович, Савицький Олександр Михайлович, Ващенко Володимир Миколайович, Коровін Іван Андрійович | Корисна модель призначена для виробництва металокомпозитних труб та трубної арматури високого тиску, армованих зміцнюючою оболонкою-каркасом |
| 113424 | 17.07.2026 | ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДИFUЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРИШАРОВИХ СТІЛЬНИКОВИХ ПАНЕЛЕЙ | Фальченко Юрій Вячеславович, Устїнов Анатолій Іванович, Петрушинець Лідія Вячеславівна, Мельниченко Тетяна Всеволодівна, Федорчук Віктор Євгенович, Яценко Віталій Олексійович | Пристрій призначений для дифузійного зварювання через прошарок |
| 114593 | 29.09.2026 | КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРЕНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК У ШЛЯХОВИХ УМОВАХ | Пантелеймонов Євген Олександрович | Пристрій призначений для термічної обробки зварних з'єднань способом індукційного нагрівання струмами високої частоти |
| 114804 | 17.07.2026 | СПОСІБ ДИFUЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРИШАРОВИХ СТІЛЬНИКОВИХ ПАНЕЛЕЙ | Фальченко Юрій Вячеславович, Устїнов Анатолій Іванович, Петрушинець Лідія Вячеславівна, Мельниченко Тетяна Всеволодівна, Федорчук Віктор Євгенович, Теличко Володимир Олексійович, Мохнюк Анатолій Андрійович | Спосіб призначений для дифузійного зварювання з використанням активуючого пористого прошарку |
| 116086 | 02.11.2026 | ІНДУКЦІЙНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРЕНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК | Письменний Олександр Семенович, Пантелеймонов Євген Олександрович, Римар Сергій Володимирович, Губатюк Руслан Сергійович | Пристрій призначений для термічної обробки струмами високої частоти зварних стиків залізничних рейок перед загартуванням |
| 116808 | 24.11.2016 | ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ (З ОДНОЧАСНИМ ВІДРІЗАННЯМ) НАДТОНКИХ ПЛІВОК, ТКАНИХ, ПЛЕТЕНИХ АБО НЕТКАНИХ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ | Юрженко Максим Володимирович, Гальчун Анатолій Миколайович, Шадрін Андрій Олександрович | Пристрій призначений для виготовлення виробів (наприклад, мішечків, фільтрів і т.д.) з одношарових та/або багатшарових надтонких плівок, тканих, нетканих або плетених термопластичних полімерних матеріалів, і використовується для виробництва витратних елементів (наприклад, фільтрів одноразового або багаторазового використання) для обладнання, призначеного для фільтрації та/або зіджування рідин, сумішей в галузях харчової, хімічної та нафтопереробної промисловості, сільського господарства та медицини |

| | | | | |
|--------|------------|---|---|--|
| 117691 | 05.12.2026 | АКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОД ДЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ЕЛЕКТРОХІРУРГІЇ | Дубко Андрій Григорович, Чвортко Наталія Анатоліївна, Сіленко Андрій Костянтинович, Васильченко Валерій Андрійович | Активний електрод вдосконаленої форми призначений для використання в усіх відомих видах високочастотної електрохірургії (коагуляція, трансмуральна абляція, зварювання та інші) |
| 118517 | 08.03.2027 | СПОСІБ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНІВ | Демченко Валерій Леонідович, Юрженко Максим Володимирович | Спосіб призначений для зварювання термопластичних полімерів, і застосовується при з'єднанні виробів із пластмас, труб, деталей конструкцій тощо |
| 118873 | 03.04.2027 | СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ МІДНОЇ СТІНКИ КРИСТАЛІЗАТОРА УСТАНОВКИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ МЕТАЛІВ | Григоренко Георгій Михайлович, Полещук Михайло Анатолійович, Зеленін Віталій Іванович, Доценко Ігор Володимирович, Теплюк Віктор Михайлович, Нікітюк Юрій Анатолійович, Зеленін Стор Віталійович | Спосіб призначений для виготовлення кристалізаторів установок безперервного лиття сталі та кольорових металів |
| 120090 | 09.04.2027 | СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ В СЕРЕДОВИЩІ ЗАХИСНИХ ГАЗІВ | Жерносков Анатолій Максимович, Мельниченко Николай Трофімович, Пентегов Ігор Володимирович, Сидорець Володимир Миколайович, Римар Сергій Володимирович | Спосіб призначений для покращення якості зварних швів і з'єднань |
| 127598 | 18.03.2028 | СПОСІБ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВИМ ДРОТОМ ПІД ФЛЮСОМ | Рябцев Ігор Олександрович, Бабінець Анатолій Анатолійович, Лентюгов Іван Павлович | Спосіб призначений для виготовлення або зміцнення деталей у машинобудівній, гірничо-металургійній та інших галузях індустрії |
| 129894 | 16.03.2026 | СПОСІБ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ІЗ СКАНУВАННЯМ ВИПРОМІНЮВАННЯ | Кривцун Ігор Віталійович, Хаскін Владислав Юрійович, Коржик Володимир Миколайович, Шевченко Віталій Юхимович | Спосіб призначений для зварювання сталей і сплавів без попереднього знежирювання та очищення від окислів або поверхневих покриттів крайок, що зварюють |
| 129895 | 28.04.2026 | СПОСІБ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ | Кривцун Ігор Віталійович, Хаскін Владислав Юрійович, Коржик Володимир Миколайович, Шевченко Віталій Єфимович, Гринюк Андрій Андрійович, Бабич Олександр Анатолійович, Пелешенко Святослав Ігоревич, Ткачук Василь Іванович | Спосіб призначений для лазерно-плазмового зварювання стикових, напускних та торцевих з'єднань зі сталей і сплавів |
| 130973 | 15.03.2028 | БІПОЛЯРНИЙ ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕКОНСТРУКТИВНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ХІРУРГІЇ | Маринський Георгій Сергійович, Васильченко Валерій Андрійович, Чвортко Наталія Анатоліївна, Чернець Олександр Владиславович, Ткаченко Віктор Аркадійович, Подпратов Сергій Євгенійович, Подпратов Сергій Сергійович, Дубко Андрій Григорович, Александров Анатолій Михайлович, Лопаткіна Катерина Гордіївна, Ткаченко Сергій Вікторович | Інструмент призначений для використання у реконструктивно-відновлювальній хірургії, зокрема, для лікування хвороб кісток (наприклад, остеомієліту, онкологічних захворювань та інш.), при проведенні хірургічних втручань в галузі ортопедії |

| | | | | |
|--------|------------|---|--|---|
| 134552 | 09.12.2028 | ПОКРИТТЯ ЕЛЕКТРОДА | Захаров Леонід Степанович, Гаврик Андрій Романович | Продукт призначений для виготовлення електродів для ручного електродугового зварювання сталей |
| 135155 | 28.10.2028 | ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ БІПОЛЯРНОГО ВИСОКОЧАСТОТНОГО З'ЄДНАННЯ ЗВАРЮВАННЯМ ТКАНИН ТВЕРДОЇ МОЗКОВОЇ ОБОЛОНКИ В НЕЙРОХІРУРГІЇ | Васильченко Валерій Андрійович, Кваша Михайло Сергійович, Маринський Георгій Сергійович, Кривцун Ігор Віталійович, Чвертко Наталія Анатоліївна, Чернець Олександр Владиславович, Александров Анатолій Михайлович, Лопаткіна Катерина Гордіївна, Ткаченко Віктор Аркадійович, Кваша Олена Михайлівна, Дащаківський Андрій Володимирович | Пристрій призначений для вирішення однієї з найактуальніших проблем сучасної нейроонкології та нейрохірургії - забезпеченню надійного з'єднання розрізів тканин твердої мозкової оболонки (ТМО) при операціях по видаленню пухлин головного мозку |
| 136339 | 14.03.2029 | МАШИНА ДЛЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ ТА ТРУБНИХ ЗАКІНЧЕНЬ, ЩО НАГРІВАЮТЬСЯ ДУГОЮ, КЕРОВАНОЮ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ | Кучук-Яценко Сергій Іванович, Качинський Володимир Станіславович, Галахов Микола Вікторович, Клименко Володимир Іванович, Коваль Михайло Павлович | Машина призначена для пресового зварювання труб та трубних закінчень (різних штуцерів, фланців та ін.), що нагріваються дугою, керованою магнітним полем |
| 140547 | 22.04.2029 | МАШИНА ДЛЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ, ЩО НАГРІВАЮТЬСЯ ДУГОЮ, КЕРОВАНОЮ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ | Кучук-Яценко Сергій Іванович, Качинський Володимир Станіславович, Галахов Микола Вікторович, Клименко Володимир Іванович, Коваль Михайло Павлович | Машина призначена для використання на підприємствах машинобудування, у т.ч. верстатобудування (розводка гідравліки на верстатах та механізмах, у амортизаторах); для будівництва теплиць, систем поливу тощо |
| 140906 | 04.09.2029 | СПОСІБ АДАПТИВНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ | Куц Юрій Васильович, Шаповалов Євген Вікторович, Учанін Валентин Миколайович, Долиненко Володимир Володимирович, Редька Михайло Олександрович | Спосіб призначений для автоматизованого контролю виробів складної геометрії, виконаних з електропровідних матеріалів, на предмет наявності дефектів |
| 143235 | 28.05.2028 | СПОСІБ АДТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛЕВИХ 3D-ВИРОБІВ | Григоренко Георгій Михайлович, Костін Валерій Анатолійович, Григоренко Світлана Георгіївна, Шаповалов Віктор Олександрович, Ахонін Сергій Володимирович, Пікулін Олександр Миколайович | Спосіб призначений для виготовлення тривимірних металевих виробів шляхом пошарової наплавки в захисній контрольованій атмосфері на підкладку витратним матеріалом з присадкового дроту |
| 143908 | 10.10.2029 | ПЕРЕНОСНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК | Пантелеймонов Євген Олександрович | Пристрій призначений для термічної обробки зварних з'єднань із застосуванням індукційного нагрівання струмами високої частоти |
| 145801 | 29.06.2030 | СПОСІБ ОТРИМАННЯ ТРИШАРОВИХ СТИЛЬНИКОВИХ ПАНЕЛІЙ З ЗАПОВНЮВАЧЕМ, ВИГОТОВЛЕНИМ З ШАРУВАТОГО БІМЕТАЛЕВОГО МАТЕРІАЛУ | Фальченко Юрій В'ячеславович, Петрушинець Лідія В'ячеславівна | Спосіб призначений для виготовлення елементів конструкцій літальних (космічних) апаратів з підвищеними експлуатаційними якостями - наприклад, панелі антиметеоритного захисту |
| 145831 | 14.07.2030 | ПОРТАТИВНА СИСТЕМА РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ | Троїцький Володимир Олександрович, Шалаєв Володимир Олексійович, Карманов Михайло Миколайович | Пристрій призначений для визначення місця розташування дефектних зон конструкцій і деталей, зокрема, для виявлення дефектів зварних з'єднань |

| | | | | |
|--------|------------|--|--|--|
| 146869 | 26.07.2030 | ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЕНДОСКОПІЧНИХ МАЛОІНВАЗИВНИХ ОПЕРАТИВНИХ ВТРУЧАНЬ В АБДОМІНАЛЬНІЙ ХІРУРГІЇ | Фомін Петро Дмитрович, Васильченко Валерій Андрійович, Опарін Сергій Олександрович, Фелештинський Ярослав Петрович, Чвертко Наталія Анатоліївна | Електрохірургічний інструмент призначений для вирішення однієї з найактуальніших проблем абдомінальної хірургії - припинення кровотеч при екстрених ситуаціях в лікуванні виразок шлунково-кишкового тракту |
| 147279 | 07.10.2030 | СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ БІОЛОГІЧНОЇ ТКАНИНИ | Кривцун Ігор Віталійович, Пентегов Ігор Володимирович, Сидорець Володимир Миколайович, Римар Сергій Володимирович | Спосіб призначений для визначення активної діелектричної проникності біологічних тканин для встановлення параметрів їх електричних властивостей при впливі на них електричного струму |
| 147280 | 07.10.2030 | СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО АКТИВНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ БІОЛОГІЧНОЇ ТКАНИНИ | Кривцун Ігор Віталійович, Пентегов Ігор Володимирович, Сидорець Володимир Миколайович, Римар Сергій Володимирович | Спосіб призначений для визначення питомого активного електричного опору біологічних тканин для встановлення параметрів їх електричних властивостей при впливі на них електричного струму |
| 149152 | 01.06.2031 | ІНДУКЦІЙНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ СТИКІВ ТРАМВАЙНИХ РЕЙОК | Пантелеймонов Євген Олександрович, Дацюк Ірина Ігорівна | Пристрій призначений для термічної обробки зварних стиків трамвайних рейок |
| 149201 | 15.03.2031 | СПОСІБ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АЕРОКОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ | Троїцький Володимир Олександрович | Спосіб призначений для контролю стану аерокосмічних літальних апаратів, у т.ч. їх відповідальних вузлів, апаратури і систем, як у стаціонарних умовах, так і в польоті |
| 151056 | 11.10.2031 | СПОСІБ ОТРИМАННЯ ЛІГАТУР ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЄВИХ ТА ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ | Ахонін Сергій Володимирович; Пікулін Олександр Миколайович; Березос Володимир Олександрович; Северин Андрій Юрійович; Єрохін Олексій Геннадійович | Спосіб призначений для виробництва лігатур для легування і модифікування алюмінієвих сплавів, що містять цирконій і титан, а також для легування титанових сплавів |
| 151234 | 24.12.2031 | СПОСІБ ВИПРОБУВАННЯ НА МІЦНІСТЬ З'ЄДНАННЯ КОАКСІАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ | Матвеев Ігор Володимирович; Полещук Михайло Анатолійович; Серебряник Ілля Павлович; Бовкун Віктор Олексійович; Малахова Людмила Михайлівна; Фадєєв Віктор Григорович | Спосіб призначений для оцінювання міцнісних характеристик з'єднань шарів композитних матеріалів, які застосовуються в різних галузях машинобудування, головним чином - для визначення стійкості до деформації зрізом біметалевих виробів, зокрема мідно-сталевих |
| 151635 | 22.11.2031 | МАШИНА ДЛЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ, ЩО НАГРІВАЮТЬ ДУГОЮ, КЕРОВАНОЮ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ | Качинський Володимир Станіславович; Галахов Микола Вікторович; Клименко Володимир Іванович | Машина призначена для пресового зварювання труб, які нагрівають дугою, керованою магнітним полем |
| 151639 | 10.12.2031 | ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ КАЛЬЦІЙНИХ УТВОРЕНЬ СУДИН | Маринський Георгій Сергійович; Васильченко Валерій Андрійович; Чвертко Наталія Анатоліївна; Ткаченко Віктор Аркадійович; Александров Анатолій Михайлович; Лопаткіна Катерина Гордіївна | Інструмент призначений для відновлення кровопротічності судин, у т.ч. магістральних (судинна хірургія) |
| 151770 | 20.09.2031 | ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯТОР ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ЕКВЗ-300 «ПАТОНМЕД» | Ткаченко Віктор Аркадійович; Маринський Георгій Сергійович; Подпратов Сергій Євгенійович; Чвертко Наталія Анатоліївна; Ткаченко Сергій Вікторович; Чернець Олександр Владиславович; Грабовський Сергій Дмитрович | Апаратура призначена для хірургічних процесів обробки біологічних тканин людини і тварин з використанням височастотного струму для заміни існуючих шовних методів |

| | | | | |
|--------|------------|---|---|--|
| 151797 | 14.01.2032 | МАШИНА ДЛЯ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ РЕЙОК | Зягор Ігор Васильович; Коваль Микола Йосипович; Дідковський Олександр Володимирович; Левчук Андрій Миколайович; Шило Юрій Анатолійович; Антіпін Євген Валентинович; Кавуніченко Олександр Васильович; Гушин Костянтин Віталійович; Завертаний Мирослав Сергійович; Наконечний Андрій Олександрович; Самотрясов Сергій Михайлович; Терещенко Галина Костянтинівна; Лебедева Олена Аркадіївна | Машина призначена для контактного стикового зварювання рейок і може використовуватись як при ремонті рейкових колій в польових умовах, так і при зварюванні окремих рейок в важкодоступних місцях, зокрема, вварювання хрестовин в залізничну колію, в тунелях метрополітену та зварюванні рейок, які пролягають на близькій відстані одна від одної та прокату різного профілю тощо |
| 151935 | 22.11.2031 | МАШИНА ДЛЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ ТА ТРУБНИХ ЗАКІНЧЕНЬ, ЩО НАГРІВАЮТЬСЯ ДУГОЮ, КЕРОВАНОЮ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ | Качинський Володимир Станіславович; Галахов Микола Вікторович; Клименко Володимир Іванович | Машина для пресового зварювання труб, в тому числі і тонкостінних, та трубних закінчень (донця, штуцерів, фланців та ін.), що нагріваються дугою, керованою магнітним полем, може використовуватись у різних галузях промисловості та будівництва, при зварюванні трубчастих деталей різноманітного призначення та конфігурації, для виконання монтажних і ремонтних робіт |

XXI МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2023

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

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

30 – 01

ТРАВНЯ ЧЕРВНЯ

Генеральний інформаційний партнер:

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

+38 (095) 268-05-87, (84)

is@iec-expo.com.ua,
helen@iec-expo.com.ua

www.iec-expo.com.ua

ДОКЛАДИ 75-ї ЩОРІЧНОЇ АСАМБЛЕЇ МІЗ

16-22 липня 2022 р., Токіо, Японія

Документи комісії І-С «Адитивне виробництво, термічне різання та термічне розпилення»

IW-1493-2022 «Numerical study of a plasma jet for plasma-assisted laser cutting», by S. Manzke, M. Krümmner, U. Füssel, F. Urlau, C. Leyens, A. Mahrle (Germany).

IW-1495-2022 «Volumetric elements – strategies for geometrically complex parts», by Johanna Müller, Jonas Hensel (Germany).

IW-1503-2022 «3-D printing of spatial products made of steel and non-ferrous alloys using electric arc heat», by Ivan Lahodzinskyi, Volodymyr Korzhyk, Viktor Kvasnytskyi, Andriy Perepichay, Andriy Grynyuk, Yevhenii Illiashenko, Sviatoslav Peleshenko (Ukraine).

IW-1502-2022 «Influence of Heat Control on Properties and Residual Stresses of Additive-Welded High-Strength Steel Components», by Ronny Scharf-Wildenhain, André Haelsig, Jonas Hensel, Karsten Wandtke, Dirk Schroepfer, Arne Kromm, and Thomas Kannengiesser (Germany).

IW-1504-2022 «Visualization of gas flow inside the kerf using Schlieren method and image processing in thermal cutting», by Sang-Hyun Ahn, Upen-dra Tuladhar, Dae-Won Cho, Young-Whan Park, Seokyoung Ah (South Korea).

IW-1506-2022 «Application of plasma-arc atomization of compact and flux-cored wires to obtain spherical granules and powders», by Dmitry Stroganov (Ukraine).

IW-1510-2022 «Chaboche viscoplastic material model for process simulation of additively manufactured Ti-6Al-4V parts», by S. Springer, B. Seisenbacher, M. Leitner, F. Grün, T. Gruber, M. Lasnik, B. Oberwinkler (Austria).

Документи комісії ІІ-С «Дугове зварювання та присадні метали»

IIW-2238-2022 «Open gap root welding of austenitic stainless steel without the use of backing gas», by J. McNicol and C. Fink.

IIW-2246-2022 «Simulated heat affected zone ferrite content influence on toughness for standard duplex and new duplex stainless steel grade with enhanced weldability», by A. Higelin, S. L. Manchet, G. Passot and J. Grocki.

IIW-2239-2022 «Effect of Mo in Ni-30Cr Filler Metal on the Eutectic Phases of Weld Metal», by X. Guo, K. Xu, C. Wei, Y. L. Jiang, X. C. Lv and Y. J. Xu.

IIW-2221-2022 «A renewed understanding of Ti, B, Al, O and N addition to Fe-C-Mn high strength steel weld metals», by K. Sampath.

IIW-2224-2022 «Effect of Ni Content on Low-Temperature Toughness of Low-alloy Steel Welds», by Ma. Yiming, Lv Xiaochun, Guo Xiao and An Hongliang.

IIW-2237-2022 «Effect of microstructural heterogeneities on variability in low-temperature impact toughness on multi-pass weld metal of 420 MPa offshore engineering steel», by S. Nellikode, Y-G Back, S-J Jung, I-C Kim, S-D Kim and Y-D Park.

IIW-2245-2022 «The Effect of Micro-alloys on the Ultimate Tensile Stress of C-Mn Multi-run Weld Metal», by G. M. Evans.

IIW-2222-2022 «Substructure & fracture toughness of 9Cr-1.5Mo-Co#V-Nb-N-B creep resisting cast steel (COST-CB2)», by S. T. Mandziej and A. Vyrostkova.

IIW-2223-2022 «Effect of PWHT and welding procedure on the properties and microstructure of the weld metal matching MARBN alloys», by S. Roberts, J. Wildgoose, M. Jepson, W. Philpott, Z. Zhang and D. Allen.

IIW-2229-2022 «Welding materials for TIG welding, surfacing and WAAM technology of titanium alloys», by S. Schwab, R. Selin, M. Voron.

IIW-2230r1-2022 «Weldability assessment of new nanoparticle#reinforced aluminium metal matrix composites (Al-MMCs) in the FLAMINGo project», by B. Correia, A. B. Lopez, V. Ferreira, P. J. Morais.

Документи комісії ІІІ-С «Зварювання опором та суміжні процеси з'єднання»

IIW-2084-22 «Development of double-sided friction stir welding of advanced high strength steel sheets», by Muneo Matsushita, Daiki Yamagishi, Satoshi Igi and Rinsei Ikeda, Japan.

IIW-2091-22 «Project RESURGAM: The development of friction stir welding of steel for the fabrication and under-water repair of ships», by Stephen Cater, Jonathan Martin, Santonu Ghosh, UK.

IIW-2086-22 «Development of solid state resistance spot joining method», by Takumi Aibara, Masayoshi Kamai, Yoshiaki Morisada, Takaaki Miyauchi, Shinichi Hasegawa and Hidetoshi Fujii, Japan.

IIW-2082-22 «A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding», by Michael Hasieber, Felix Wenz, Michael Grätzel, James Andrew Lenard, Sebastian Matthes and Jean Pierre Bergmann, Germany, Germany.

IIW-2082-22 «A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding», by Michael Hasieber, Felix Wenz, Michael Grätzel, James

Andrew Lenard, Sebastian Matthes and Jean Pierre Bergmann, Germany, Germany.

IIIW-2083-22 «Influence of different surface conditions on mechanical properties during ultrasonic welding of aluminum wire strands and copper terminals», by Pascal Pöthig, Michael Grätzel, Jean Pierre Bergmann, Germany.

IIIW-2102-22 «Effect of ultrasonic vibration on the thermo-mechanical process variables in dissimilar Al/Mg alloys FSW», by C.S. Wu, M. Zhai, T. Wang, PR China.

IIIW-2085-22 «Examination of post heating conditions to improve CTS of resistance spot weld joints», by Taiga Taniguchi, Seiji Furusako, Shinji Kodama, Japan.

IIIW-2099-22 «ANN versus RF in RSW monitoring», by Munkhchimeg Raash and Hee S. Chang, Republic of Korea.

IIIW-2098-22 «Influence of Surface Irregularities in Resistance Welding», by Martin Baumgarten, Stefan Heilmann, Christian Mathiszik, Jörg Zschetzsche and Uwe Füssel, Germany.

IIIW-2095-22 «Development of RSW technology on automotive DP steels for dynamic loading», by L. Prém, Á Meilinger, Marcel Gáspár, Hungary.

IIIW-2110-22 «Generalization of Metallurgical and Mechanical Models for Integrated Simulation of Automotive Lap Joining», by Eric Brizes and Antonio J. Ramirez, USA.

IIIW-2093-22 «Evaluation of joint quality in resistance spot welding by energy parameters», by Yevgenia Chvertko, Ukraine.

IIIW-2108-22 «Resistance Spot-Welding of Fe-Al Using Interlayer Technology», by B. Lara, L. Ammanuel, R. Giorjao, and A. Ramirez, USA.

IIIW-2092-22 «Effect of process parameters on the liquid metal embrittlement (LME) cracking in the resistance spot welding of zinc-coated steels», by Woo-Sung Jin, Arun Lalachan, Il-Guk Jo, Changwook Ji, Yeong-do Park, Republic of Korea.

IIIW-2094-22 «High cycle fatigue behaviour of a resistance spot welded advanced high strength steel», by Bindu Pal, Murugaiyan Amirthalingam and S. Ganesh Sundara Raman, India.

IIIW-2105-22 «Reduction of LME cracking severity in dissimilar resistance spot welded third generation advanced high strength steel with associated mechanisms», by M. Patel, M. Shojaei, A. R. H. Midawi, O. Sherepenko, H.Ghassemi-Armaki, E. Biro.

III-2096-22 «Thermal influence of resistance spot welding on nearby overmolded plastic-metal joints», by Jan Wippermann, Gerson Meschut, Wikentji Koschukow, Alexander Liebsch, Maik Gude, Steven Minch, Björn Kolbe, Germany.

III-2089-22 «Numerical study on thermal behavior in Cu wire to Kovar foil resistance micro-welding with a triple electrode configuration», by Nannan Chen, G. Wu, Min Wang, X. Hua, Z. Wang, Yi Wei, PR China.

III-2109-22 «Shifting Timing and Location of Shoulder LME Cracks with Welding with Radius Faced Electrodes or Expulsion Conditions», by S. Song, M. Patel, O. Sherepenko, E. Biro, Canada.

III-2106-22 «Successive friction stir processing/transient liquid phase bonding (FSP/TLP) of AISI304 stainless steel», by R. Bakhtiari, H. Nikukar, M. Divandari, E. Biro, Canada.

III-2100-22 «Application of electrical power measurements for process monitoring in ultrasonic metal welding», by Florian W. Müller, Chun-Yu Chen, Alexander Schiebahn, Uwe Reisingen, Germany.

III-2104-22 «Influence of the temperature conditions on the joining quality during refill friction stir spot welding of aluminium», by Dennis Lauterbach, Nima Eslami, Alexander Harms, Daniel Keil, Klaus Dilger, Germany.

III-2107-22 «Influence of cold sprayed Zn interlayer on microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded dissimilar Al/Mg joints», by Xinyu Liu, Zhikang Shen, Wenya Li, PR China.

III-2103-22 «Hybrid Friction Eutectic Bonding (HFEB) of aluminium and copper», by Anna Regensburg, Germany.

III-2087-22 «Friction stir lap welding of plastic to metal using adjustable tool», by Yefei Gao, Naotsugu Yamamoto, Jinsun Liao, Yoshiaki Morisada and Hidetoshi Fujii, Japan.

III-2101-22 «Non-destructive evaluation of the Friction Stir Welding process, generalizing a deep neural defect detection network to identify internal weld defects across different Aluminum Alloys», by P. Rabe, A. Schiebahn, U. Reisingen, Germany.

III-2088-22 «Material flow and thermal-mechanical analysis of Al/steel friction stir lap joining process», by Ninshu Ma, Peihao Geng, Hidetoshi Fujii, Japan.



INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING

A world of joining experience

iiwelding.org

ЖІНКИ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА В НАУЦІ

Щорічно 11 лютого за рішенням ООН відзначається Міжнародний день жінок і дівчат у науці (International Day of Women and Girls in Science). Цей день «заснований для того, щоб досягти повного і рівного доступу жінок і дівчат до науки, а також забезпечити гендерну рівність і розширення прав і можливостей жінок і дівчат». Головна мета рішення ООН – досягнення якісних змін у процесі залучення жінок і дівчат у науку. Дослідження, проведені в 14 країнах, показали певний дисбаланс в участі у науковій сфері між чоловіками і жінками. Так, можливість отримання ступеня бакалавра, магістра та доктора для жінок у сфері науки становить 18, 8 і 2 % відповідно, в той час як для чоловіків ці показники становлять 37, 18 та 6 %. За даними Інституту статистики ЮНЕСКО, лише 30 % наукових працівників у світі – жінки. Керівні посади в наукових установах Європи займають тільки 11 % жінок. В Україні статистика значно вища – 46 % жінок займаються наукою. Втім і в нашій країні жінки рідше посідають керівні посади, мають меншу зарплатню, менше представлені у галузях технологій, інжинірингу, математики.

Щиро вітаємо науковиць ІЕЗ, а також всіх жінок, що обрали науку своєю професією, та бажаємо ніколи не зупинятися на досягнутому, не сумніватися у своїх силах та правильності обраного шляху!

Редакція журналу «Автоматичне зварювання» вирішила підготувати для лютого випуску журналу інтерв'ю з жінками – керівниками наукових відділів та докторами наук, які працюють в ІЕЗ. Питання до всіх однакові.



З чим пов'язана Ваша наукова діяльність?

Чому Ви обрали науку своєю професією?

На Вашу думку, чи існують гендерні бар'єри в науці та чи відчували Ви їх на власному досвіді?

Чи вдається гармонійно поєднувати всі сфери Вашого життя?

Побажання.



Олена БЕРДНІКОВА. Доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів.

Моя діяльність стосується напрямку комплексних досліджень фізико-хімічних та структурних процесів, їх впливу на властивості металів, сплавів, зварних з'єднань для наукоємного направлено застосування при впровадженні перспективних технологій зварювання, отримання композиційних покриттів, виробів тугоплавких металів за новітніми адитивними 3D-технологіями.

Після закінчення інституту я відразу потрапила до відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів, який очолював Г.М. Григоренко. Саме під його керівництвом та завдяки професійному досвіду Л.І. Маркашової, яка очолювала лабораторію електронної мікроскопії, а також при підтримці моїх колег я багато чому навчилася та стала вченим матеріалознавцем. Насправді, це

дуже цікаво – досліджувати, отримувати нові результати, знаходити відповіді на наукові запитання та, відповідно, отримувати наукове задоволення від цього.

Особисто я ніколи не відчувала гендерні бар'єри у науковій галузі. На мою думку, ця проблема майже відсутня у сучасній науці.

Нажаль, не завжди вдається поєднувати всі сфери життя. Наприклад, на протязі декількох років, перебуваючи у відпустці, я багато працювала над докторською дисертацією.

Бажаю усім чистого мирного неба, здоров'я, щастя та творчих успіхів!



Наталія ВІГЛЯНСЬКА. Кандидат технічних наук, завідувачка відділу захисних покриттів.

Моя наукова діяльність пов'язана з дослідженням фізико-хімічних процесів при формуванні захисних покриттів, отриманих газотермічним напиленням, розробкою композиційних матеріалів для напилення, дослідженні структури, фазового складу та функціональних властивостей покриттів.

Насамперед через інтерес до того, що раніше не було досліджено, до будови матеріалів на мікро- та макрорівнях та через прагнення створити щось нове, щоб зробити свій внесок у розвиток суспільства.

Протягом більшої частини історії жінки стикалися з серйозними перешкодами на шляху до наукової кар'єри. В останні роки у більшості країн світу та в Україні, зокрема, зростає визнання важливості інтегрування жінок у науку, вживаються зусилля для заохочення жінок до вивчення наукових дисциплін, тощо. Особисто я стикалася з цією проблемою і це завжди стимулювало мене подолати ці гендерні стереотипи, довести свою компетентність у науковій сфері та досягти більших успіхів. Але в більшості випадків у науковій сфері мені зустрічаються люди, які завжди готові надати підтримку та наставництво, за що я їм безмежно вдячна.

Так, мені успішно вдається поєднувати наукову діяльність з іншими сферами життя за рахунок вміння балансувати між різними зобов'язаннями та інтересами, а наукові знання та навички часто допомагають у вирішенні практичних проблем та прийнятті більш усвідомлених та обдуманих рішень.

Найголовніше – це вірити у свої здібності та можливості. Потрібно буде старанно працювати і зосередитися на досягненні ваших цілей. Наука може бути складною та вимогливою, але вона також може бути дуже стимулюючою. Наука може допомогти вирішувати важливі проблеми та покращувати життя людей, і ваш внесок може бути дуже значним. Бажаю успіхів!



Лана ГРИГОРЕНКО. Кандидат технічних наук, завідувачка відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів.

Сфера моєї наукової діяльності – фізико-хімічні дослідження матеріалів, вивчення особливостей формування структури нероз'ємних з'єднань однорідних та різнорідних металів та сплавів; дослідження структури сучасних титанових сплавів та їх з'єднань, отриманих різними методами зварювання.

На вибір професії вплинув приклад батька. У нас завжди був тісний зв'язок, він багато і цікаво розповідав про свою роботу і я завжди пишалася його досягненнями. Я навчалася за спеціальністю «металознавство», бо, як мені здавалося, це більш «дівоча» професія. Працювати в Інституті я прийшла в тяжкі, особливо для науки, 90-ті роки. Мені пощастило потрапити у лабораторію «Дифузійного зварювання». У цьому колективі я відчула, що мої знання потрібні. Я полюбила свою роботу, у мене з'явилася зацікавленість. Я зрозуміла, що хочу займатися не загалом матеріалознавчим супроводом технологічних робіт, а наукою. Я навчилася планувати досліді, щоб отриманий результат дозволив зробити наукові висновки, навчилася писати статті. Закінчила аспірантуру і захистила кандидатську дисертацію. Тож наука стала моєю професією завдяки прикладу мого батька та вдачі опинитися у чудовому колективі на початку наукового шляху.

Особисто я ніколи не наштотувалася на гендерні бар'єри. Я, взагалі, не вважаю, що стать має значення в характеристиці науковців. У нашому Інституті завжди було і є багато дівчат, які займаються наукою, навчаються в аспірантурі, захищають дисертації. За останні три роки у нас докторські дисертації захистило більше жінок, ніж чоловіків. Та і в інших інститутах багато знайомих жінок – науковці.

Не знаю, наскільки всі сфери гармонійно, але вдається поєднувати. Бо жінка вміє все планувати і на роботі, і дома.

Я бажаю всім жінкам, які хочуть пов'язати своє життя з наукою, досягнення мети. Для цього потрібно завжди ставити високі цілі і розуміти, що для їх досягнення треба дуже любити свою професію й багато працювати.



Тетяна ЛАБУР. Доктор технічних наук, головний науковий співробітник відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів.

Науковими напрямками моєї діяльності є технології зварювання алюмінієвих сплавів різних систем легування. Особливу увагу приділяю вивченню задач, пов'язаних з умовами формування нероз'ємних з'єднань і закономірностей структурних перетворень при зварюванні плавленням, а також причин виникнення дефектів і холодних тріщин у швах, появі надмірних інтерметалічних включень та крихких ділянок, їх взаємозв'язок з характеристиками міцності, в'язкості та механізмами зародження та розповсюдження тріщин в процесі руйнування зварних з'єднань, визначення їх корозійної тривкості.

Схильність до пізнання особливостей явищ та подій в навколишньому середовищі, а також потреба їх аналізувати спонукали мене присвятити життя науці. Ці якості стали відправними для активної дослідницької роботи.

Для фахівців Інституту пріоритетними залишаються знання в галузі інженерних наук і технологій. До сфери наукових інтересів фахівців чоловічої статі слід віднести роботи стосовно розробки техніки і технології зварювання різних металічних матеріалів, які застосовуються у машинобудуванні та будівельних спорудах. Наукова робота жінок переважно пов'язана з вивченням і систематизацією матеріалознавчих аспектів формування нероз'ємного з'єднання при зварюванні плавлення або у твердій фазі на базі вивчення особливостей кристалізації різних металів, встановлення природи структурної і хімічної неоднорідності швів і зони термічного впливу.

Слід відзначити, що розширення кола фундаментальних досліджень сприятиме пошуку нових інноваційних науково-технічних принципів створення та подальшої модернізації ресурсозберігаючих технологій зварювання та споріднених процесів, які забезпечать зростання наукових досягнень Інституту в майбутньому. Вони можуть бути отримані на паритетній основі вчених та фахівців, жінок і чоловіків ІЕЗ в співдружності з науковим товариством.

Гармонійно поєднувати всі сфери приватного життя нелегко, але цікаво!

Бажаю всім цікавої роботи і отримання задоволення від неї.



Світлана МАКСИМОВА. Доктор технічних наук, завідувачка відділу фізико-хімічних процесів паяння.

Моя наукова діяльність пов'язана з дослідженням фізико-металургійних процесів при високо- та низькотемпературному паянні конструкційних матеріалів, розробленням припоїв для виготовлення відповідальних виробів з різних матеріалів.

Основна причина – це цікавість, постійний пошук нового, нових рішень. Наприклад, у моїй роботі поєднання кожної пари нових матеріалів залежить від умов експлуатації, геометричних параметрів, хімічного складу тощо. Це, наче маленька дитина, яка потребує індивідуального підходу, постійної уваги і піклування.

Такі проблеми притаманні різним сферам діяльності і не лише в Україні. І наша галузь не виключення. Але останнім часом відбуваються якісні зміни в нашому Інституті і гендерна ситуація змінюється на краще.

Це важке і болюче питання. Намагаюсь поєднувати всі сфери, але іноді доводиться йти на жертви заради професійних здобутків.

Можливо у мене «застарілі» підходи до виконання професійних обов'язків, але я вважаю, що в науковій діяльності немає вихідних днів. Це постійна робота над розширенням свого кругозору, вивченням світового досвіду тощо. Якщо ти любиш свою справу, то все це цікаво, можливо і приносить задоволення.



Тетяна МЕЛЬНИЧЕНКО. Доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу парофазних технологій неорганічних матеріалів.

Моя наукова діяльність пов'язана з дослідженнями в області фізичного матеріалознавства, а саме, з вивченням закономірностей формування структури та властивостей матеріалів різного класу та призначення.

Вибір професії, насправді, був визначений з дитинства – навчання в школі з поглибленим вивченням математики та фізики, участь у фізичному гуртку, батьки – науковці в області металургії. Це сприяло вибору спеціальності – фізика металів. А далі – все, як зазвичай для науковця, багато експериментальної роботи, захист кандидатської та докторської дисертацій. Моє наукове життя склалося так, що довелось проводити дослідницьку діяльність в різних областях матеріалознавства: від побудови рівноважних діаграм стану до дослідження структуроутворення матеріалів, що формуються в нерівноважних умовах осадження з парової фази, та вивчення можливості їх функціонального використання в якості покриттів, матеріалів для зварювання, медицини.

Слід зазначити, що впродовж своєї наукової діяльності я ніколи не відчувала гендерної дискримінації. Вважаю, щодо науки це недоречно, тому що «наука» сама жіночого роду. Думаю, досягнення жінки в науці залежать виключно від її бажання та можливостей. З іншого боку, працелюбність та ретельність при проведенні експерименту це ті риси, які роблять жінку незамінним співробітником будь-якого наукового колективу.

Слід зазначити, що впродовж своєї наукової діяльності я ніколи не відчувала гендерної дискримінації.

Вважаю, щодо науки це недоречно, тому що «наука» сама жіночого роду. Думаю, досягнення жінки в науці залежать виключно від її бажання та можливостей. З іншого боку, працелюбність та ретельність при проведенні експерименту це ті риси, які роблять жінку незамінним співробітником будь-якого наукового колективу.

До речі, хист до досліджень та експериментів дуже допомагає в особистому житті – в хазяйнуванні, кулінарії, садівництві, хобі і навіть при вихованні дітей.

Бажаю дівчатам, які стоять перед вибором майбутньої професії, не нехтувати можливістю реалізувати себе в сфері наукової діяльності. Тим паче, що після закінчення війни наука, технології та інновації мають стати наріжним каменем при відбудові нашої України.



Людмила НИРКОВА. Доктор технічних наук, завідувачка відділу зварювання газонафтопровідних труб.

Сфера моєї наукової діяльності – корозія та протикорозійний захист металів, дослідження причин та механізмів пошкодження сталевих об'єктів.

Завжди цікаво було експериментувати, дізнаватися як влаштовані та функціонують різні об'єкти. Вважаю, що існують. На власному досвіді відчувала.

Вважаю, що так. Але особисто у мене – робота в пріоритеті.

Я вважаю, що кожен має сам обирати свій шлях. Якщо не відчуваєш здатності поринути у дослідницький процес і маєш бажання працювати нормовано – краще шукати інше застосування своїм здібностям.



Наталія ПІСКУН. Доктор технічних наук, завідувачка відділу космічних технологій.

Моя наукова діяльність пов'язана з космічним матеріалознавством, технологією електронно-променевого зварювання, розробкою обладнання для зварювання у космосі та технологією електронно-променевого зварювання в космічних умовах.

Мені завжди був цікавий процес дослідження, причому неважливо до якої галузі знань це відноситься. Вивчаючи чи розглядаючи будь-яке питання хочеться «докопатися» до суті, до витоків явища чи процесу. Космос завжди приваблював невідомістю та новими незвіданими явищами. Доля зробила мені подарунок, так склалося, що я потрапила на роботу до відділу космічних технологій. Я дуже багато навчилася у колег, які все життя займалися створенням та експлуатацією обладнання для зварювання у відкритому космосі.

Думаю, що все ж таки існують. Чоловіків у науці більше. І, думаю, що навряд би я очолила відділ, якби мої колеги-чоловіки у відділі мали науковий ступінь доктора наук. Особисто я не відчувала до себе якогось несправедливого ставлення. Ні зі сторони керівництва, ні зі сторони колег. Тільки підтримка, розуміння, повага та допомога. Зі свого досвіду вважаю, що якщо у жінки є бажання і знання, то вона може досягти у науці не менше за чоловіків. У нас в Інституті є багато жінок кандидатів і докторів наук, які досягли великих успіхів і можуть пишатися своїми досягненнями.

Так. Мені вдається. Я завжди планую свій робочий та неробочий час. У мене є плани на день, на тиждень. І є на більш тривалий час. При правильному плануванні вдається передбачити все – вчасно виконати роботу і відпочити. Звичайно, зараз це робити складніше. Через відключення електроенергії, якихось інших несподіваних перешкод. Але я людина гнучка у цьому питанні і легко перебудовую свої плани. Намагаюся розставляти пріоритети і насамперед робити найважливіше. Крім того, мене навчили працювати швидко, тоді і встигнеш більше зробити. Буває так втомлююся, що сил немає, зате щаслива, коли все заплановане виконала.

Бажаю жити із задоволенням. Займатися улюбленою справою. Ніколи не боятися. Якщо це наука, то «докопатися до крейди». Вірити у себе, досвід попередніх дослідників. Ніколи не опускати руки. Вперед наперекір усьому. І боротися насамперед із самою собою. Коли переможеш себе, решта – буде не страшно. Завжди жити з радістю та бути задоволеним тим, що маєш: успіхам у роботі, спілкуванням з близькими та просто своєю долею.



Ганна ПОЛІШКО. Доктор технічних наук, завідувачка відділу економічних досліджень.

Моя наукова діяльність пов'язана з вивченням фізико-металургійних проблем електрошлакових технологій сучасних високолегованих сталей та сплавів для виробництва відповідальних виробів в енергетиці, нафтохімії та залізничному транспорті.

На початку своєї кар'єри, як будь-яка молода людина, була в «пошуку себе». На останніх курсах свого навчання у КПІ думала, що металургія не зовсім моє і шукала себе в інших сферах: вирішила здобувати другу вищу освіту з економіки підприємства, працювала в Міністерстві промислової політики. Але згодом зрозуміла, що хочу займатися тим, що відповідає моїй творчій індивідуальності. Тому коли мені запропонували поступити до аспірантури Інституту електрозварювання, зрозуміла, що це шанс для моєї реалізації.

Існують, але для мене такі бар'єри – це завжди додаткові мотиваційні стимули. Я дякую долі за те, що зустріла на своєму науковому шляху як чоловіків, так і жінок науковців, які завжди допомагали мені рухатися і досягати певних результатів завдяки або всупереч.

Майже. Особливість наукової діяльності полягає в тому, що ти не закінчуєш працювати із закінченням робочого часу. Для мене протягом доби достатньо часу як для відпочинку, так і для роботи. Я із задоволенням зранку їду на роботу та із задоволенням після робочого дня поспішаю додому.

Відкривайте цікавий науковий світ, бо це дійсно те, що окриляє і дає змогу реалізувати себе! Перебуваючи в постійному пошуку можна знаходити задоволення від роботи і отримувати цікаві результати як для себе, так і для суспільства. Світ науки – захоплюючий і різноманітний, але потребує багато праці, і перш за все над собою, тому хочу закінчити словами Тараса Шевченка, які сьогодні дуже актуальні, як для нашого загалом сьогоденного життя, так і зокрема наукового світу: «Борітеся – поборете!».



Мар'яна РАБКІНА. Доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу нових конструктивних форм зварних споруд та конструкцій.

Як і при перших кроках своєї ділової активності у відділі зварювання тугоплавких металів, так і в подальшому – у відділі нових конструктивних форм зварних споруд та конструкцій, моя наукова діяльність тісно пов'язана з дослідженням взаємозв'язку фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів та їх структурного стану, включаючи дислокаційну щільність, фрактографічні особливості зламів тощо.

Я народилася у родині науковців, тому в мене не залишалось ніяких шансів уникнути цієї спадщини. Разом з тим з дитинства я обожаю дивитися у калейдоскоп, в якому можна було спостерігати швидко зміну різноманітних кольорових візерунків. Тому при вступі до Київського політехнічного інституту у мене не було сумнівів, яку спеціальність обрати. Звичайно, «фізика металів», яка передбачала у майбутньому безпосереднє спілкування з мікроскопом.

Наразі ми відчуваємо гендерний вибух. Жінки на передньому краї у науці, політиці, мистецтві. Але так було не завжди. Пам'ятаю, коли понад 40 років тому, жарким липневим днем, я і ще одна співробітниця захищали кандидатські дисертації. Саме факт, що на одному засіданні Вченої ради захищають дві жінки, був нетиповим. Звісно, жінки захистились, але другим мав бути обов'язково чоловік.

Звичайно до гармонії слід прагнути, але я не впевнена, що вона має місце на протязі тривалого часу. Втім, що людина відчуває в собі і як вона виглядає ззовні у принципі не збігається.

Незалежно від статі і віку бажаю вельмишановному товариству занурюватися у причинно-наслідкові зв'язки будь-яких явищ, і в тому числі при науковій діяльності, яка просто неможлива без відповідного розумового процесу.

Прес-група ІЕЗ

♂ 587 97%

♀ 20 3%

**International Day
of Women and Girls
in Science**