

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

12
2021

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

Відкриття меморіальної дошки-горельєфу академіку Б.Є. Патону	3
Історія розвитку технологій зварювання на АТ «СМНВО – Інжиніринг»	5

МЕТАЛУРГІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

<i>Завдовеев А.В., Позняков В.Д., Rogante M., Zhdanov S.L., Kostin B.A., Solomiychuk T.G., Shyshkevych O.A.</i> Вплив форсованого режиму імпульсно-дугового зварювання на структуру і властивості з'єднань сталі класу міцності С440	11
--	----

ГІБРИДНІ ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ

<i>Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., Ілляшенко Є.В., Бернацький А.В., Пелешенко С.І.</i> Особливості лазерно-плазмового зварювання корозійностійкої сталі AISI 304 з використанням лазера	18
--	----

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ

<i>Тараборкін Л.А., Головко В.В.</i> Розрахунково-експериментальна модель розподілу неметалевих включень за розмірами в металі зварних швів	27
---	----

ЕЛЕКТРОШЛАКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю.</i> Стійкість процесу електрошлакового зварювання з біфілярною схемою живлення без вирівнювального дроту	33
---	----

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

<i>Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Цимбаліста Т.В., Кільдій А.І., Янцевиц К.В., Іпатова З.Г.</i> Отримання і властивості детонаційних покриттів на основі аморфізованого сплаву FeMoNiCrB з введенням зміцнюючих фаз	38
---	----

ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРІВ

<i>Ващук А., Юрженко М., Кораб М., Привалко Е.</i> Хімічне зварювання поліуретанів і композитів на їх основі	46
<i>Ібрагім Рамадан, Марія Танасе.</i> Експериментальне дослідження впливу параметрів зварювального процесу на механічну поведінку труб з поліетилену високої густини	51

ЗВАРЮВАННЯ ЗА КОРДОНОМ

Welding in the World № 11–12, 2021	56
--	----

ІНФОРМАЦІЯ

Програми професійної підготовки на 2022 р.	57
Розвиток зварювання пластмас в ІЕЗ ім. Є.О. Патона	60
Високопродуктивні газозахисні металопорошкові дроти для зварювання в машинобудуванні	62
Розроблено в ІЕЗ	32, 37

CONTENT

Opening of a memorial plaque-high relief to academician B.E. Paton	3
History of development of welding technologies at JSC «Sumy Machine-Building Science-and-Production Association– Engineering»	5

METALLURGY AND TECHNOLOGY OF WELDING AND SURFACING

<i>Zavdoveev A.V., Poznyakov V.D., Rogante M., Zhdanov S.L., Solomiychuk T.G., Shyshkevych O.A.</i> Influence of a forced mode of pulse-arc welding on the structure and properties of joints of steel of the strength class C440	11
---	----

HYBRID WELDING PROCESSES

<i>Korzhik V.M., Khaskin V.Yu., Grynyuk A.A., Ilyashenko E.V., Bernatskiy A.V., Peleshenko S.I.</i> Features of laser-plasma welding of corrosion-resistant steel AISI 304 using laser	18
--	----

PROCESS MODELING

<i>Taraborkin L.A., Golovko V.V.</i> Calculated-experimental model of distribution of non-metallic inclusions in the metal of welds by sizes	27
--	----

ELECTROSLAG TECHNOLOGIES

<i>Lankin Yu.M., Solovyov V.G., Tyukalov V.G., Romanova I.Yu.</i> Stability of the process of electroslag welding with bifilar power circuit without equalizing wire	33
--	----

PROTECTIVE COATINGS

<i>Borisov Yu.S., Borisova A.L., Tsimbalista T.V., Kildiy A.I., Yantsevich K.V., Ipatova Z.G.</i> Producing and properties of detonation coatings based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with addition of strengthening phases	38
--	----

POLYMER WELDING

<i>Vashchuk A., Iurzhenko M., Korab M., Privalko E.</i> Chemical welding of polyurethanes and their composites	46
<i>Ramadan Ibrahim, Tanase Maria.</i> Experimental study regarding the influence of welding parameters on the mechanical behavior of high density polyethylene pipes	51

WELDING ABROAD

Welding in the World № 11–12, 2021	56
--	----

INFORMATIONS

Vocational training programs for 2022	57
Development of plastic welding in the PWI	60
High-performance flux-cored wires for welding in mechanical engineering	62
Developed in PWI	32, 37



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
І.В. Кривцун (головний редактор),
В.М. Ліподаєв (штатний заст. гол. ред.)
О.М. Берднікова, Ю.С. Борисов,
В.В. Книш, В.М. Коржик,
Ю.М. Ланкін, Л.М. Лобанов,
С.Ю. Максимов, М.О. Пашчин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,
К.А. 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

Засновники

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

Адреса

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

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2022

Передплатний індекс 70031.

12 випусків на рік (видається щомісячно).

Друкована версія: 2880 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

Електронна версія: 2880 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается
англійською мовою під назвою
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

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

Founders

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

Address

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

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration
of KV 4788 dated 09.01.2001
ISSN 0005-111X

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

Subscription 2022

Subscription index 70031.

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

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

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

Subscription is possible for previous issues for any year.

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

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

ВІДКРИТТЯ МЕМОРІАЛЬНОЇ ДОШКИ-ГОРЕЛЬЄФУ АКАДЕМІКУ Б.Є. ПАТОНУ

11 листопада 2021 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відбулося урочисте відкриття меморіальної дошки-горельєфу директору інституту, президенту Національної академії наук України академіку Б.Є. Патону. На мітингу з нагоди цієї події були присутні співробітники ІЕЗ, Національної академії наук України, підприємств Києва, представники преси. Відкрив мітинг директор ІЕЗ академік НАН України І.В. Кривцун.

У своїй промові І.В. Кривцун зазначив, що Борис Євгенович Патон – видатний український вчений в області зварювання, металургії та технології матеріалів, матеріалознавства, видатний громадський діяч і талановитий організатор науки. Разом зі своїм батьком Євгеном Оскаровичем Патоном він створив всесвітньо відому патонівську наукову школу. Світовий авторитет Б.Є. Патону принесли різнобічна та надзвичайно плідна наукова та інженерна діяльність, прагнення направити фундаментальні наукові дослідження на вирішення проблем суспільства.

Він глибоко розумів роль науки у суспільстві, її цілі та задачі, вдало поєднував активну наукову

і суспільно-політичну діяльність. Під його керівництвом українська наука набула нового потужного імпульсу у своєму розвитку. Після розпаду Радянського Союзу і утворення незалежної України за умов гострої економічної кризи Борис Євгенович зміг зберегти академію, її основні наукові школи, принципи академічного самоуправління, здійснити перебудову структури академії відповідно до нових умов, спрямувати фундаментальні та прикладні дослідження на розв'язання нагальних задач будівництва молодії держави.

Борис Євгенович був не тільки видатним вченим і організатором науки, а й прекрасним педагогом, вчителем з великої літери. Він виховав цілу плеяду вчених в галузі зварювання, металургії, матеріалознавства. Борис Євгенович завжди був демократичним, доброзичливим, відкритим до спілкування, готовим допомогти у вирішенні не тільки наукових, а й нагальних соціальних, життєвих проблем співробітників інституту і академії.





Борис Євгенович Патон був справжнім лідером, творчою особистістю, глибоко порядною та доброю людиною, яка мала фантастичну енергію і працездатність, глибокі знання в багатьох галузях. У нього була широка натура, гострий аналітичний розум, чудове почуття гумору. Світла пам'ять про цю видатну людину, талановитого вченого, організатора науки і громадського діяча назавжди залишиться в наших серцях.

Президент академії наук України, академік А.Г. Загородній відзначив, що відкриття пам'ятного горельєфу Б.Є. Патону є важливою подією. Він був видатним вченим та інженером, видатним організатором української науки. Б.Є. Патон мав в житті дві найважливіші справи – НАН України та ІЕЗ, про яких дбав, як про рідних дітей. За часи його керівництва українська наука плідно

розвивалася, відкривалися нові інститути, виникали нові наукові напрямки досліджень. Є наука фундаментальна та прикладна, але Б.Є. Патон є яскравим прикладом того, як можна, розвиваючи цілеспрямовані фундаментальні дослідження, поєднувати ці напрями. За часів його керівництва ІЕЗ здобув світову славу передового центру науки. Відкритий сьогодні горельєф продовжить життя Б.Є. Патона в наших серцях.

Теплими словами про Бориса Євгеновича поділились також заступники директора ІЕЗ академік Л.М. Лобанов, чл.-кор. В.О. Шаповалов, завідувач відділу ІЕЗ академік К.А. Ющенко, директор Інституту проблем реєстрації інформації академік В.В. Петров та голова Комісії НАН України з питань увічнення пам'яті академіка Бориса Євгеновича Патона академік А.Г. Наумовець.

На завершення мітингу І.В. Кривцун подякував всіх присутніх та наголосив, що пам'ять про Б.Є. Патона навіки залишиться в наших серцях і кращою запорукою цьому буде плідна праця в сучасній науці за прикладом видатного вченого.

Автор дошки-горельєфу – відомий скульптор, член спілки художників України В.Г. Корень. Бронзова дошка-горельєф виконана у класичному академічному стилі традиційного портретного жанру. Інсталяція у вигляді зварювального спалаху символізує зародження нових ідей, яких у Б.Є. Патона було чимало. Горельєф створено за рахунок добровільних внесків співробітників ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Редакція журналу



ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ НА АТ «СМНВО – ІНЖИНІРИНГ»

Історія розвитку Акціонерного товариства «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – Інжиніринг» почалася з 28 листопада (за новим стилем) 1896 р. Указом Його Імператорської Величності про затвердження умов діяльності Бельгійського акціонерного товариства «Сумські машинобудівні майстерні». Його засновниками були, окрім закордонних акціонерів, сумські промисловці: П.І. Харитоненко, М.О. Суханов, Л. Кенінг, А. Гебіндер та ін.

У перші роки становлення підприємства для забезпечення виробничого процесу були задіяні європейські фахівці високої кваліфікації, насамперед, із Кайзерівської Німеччини.

З 1912 р. підприємство змінює назву на Анонімне товариство «Сумські машинобудівні заводи», а з початком Першої світової війни, коли багато іноземних фахівців прийняли російське підданство, виробничий колектив почав поповнюватися вітчизняними фахівцями.

Після закінчення Громадянської війни заводу було передано найбільш передові європейські технології в машинобудуванні і вже у 1926 р. завод випускав 4,2 % усієї продукції машинобудування Радянської України. На честь 10-річчя Червоної армії завод був перейменований на Сумський машинобудівний завод ім. М.В. Фрунзе.

У 1929 р. відбулася знаменна подія – вперше на промисловому підприємстві Радянського Союзу була запалена зварювальна дуга, що відкрила еру електродугового зварювання в радянській промисловості. Як і будь-яка інноваційна технологія, електродугове зварювання зіткнулося з багатьма проблемами під час її впровадження. Відсутність стандартів у підготовці фахівців, недосконале обладнання, відсутність якісних зварювальних матеріалів та відпрацьованих параметрів зварювання створювали великі труднощі на шляху впровадження нової технології. Всі вони з часом були подолані і на підприємстві розпочала роботу зварювальна ділянка з лабораторіями, що дозволило освоїти випуск нового складного обладнання.

З 1930 р. була організована електродна майстерня, де виготовляли електроди методом занурення. З цього часу у зварювальному виробництві використовувалися електроди лише власного виробництва.

З 1935 р. починається співпраця з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, що ознаменувало нову епоху у розвитку зварювального виробництва підприємства. Так, вже у 1936 р. була освоєна технологія зварювання хромонікелевих сталей для виготовлення обладнання, що працює в кислотовмісних та інших корозійних середови-



Під час підписання в ІЕЗ Меморандуму про співробітництво (рукоштовання директора ІЕЗ академіка Б.Є. Патона з генеральним директором СМВО В.М. Лук'яненком).



В.М. Лук'яненко в ІЕЗ ім. Є.О. Патона (зліва направо: Б.Є. Патон, В.М. Лук'яненко, К.А. Ющенко).

щах. А також були відпрацьовані практичні основи автоматичного зварювання під флюсом, що дозволило різко підвищити якість зварних швів, забезпечити високі економічні показники зварювального процесу та значно покращити умови праці електрозварників.

Після закінчення Другої світової війни співпраця з Інститутом електрозварювання виходить на новий технологічний рівень. З'являється нове обладнання та зварювальні матеріали, освоюється технологія автоматичного зварювання високолегованих сталей на установці для зварювання поздовжніх швів ємнісного обладнання та спеціалізованому стенді для зварювання кільцевих швів ємнісного обладнання діаметром до 3000 мм.

У 1950-х роках у складі котельно-зварювального цеху створюється електродна майстерня, де електроди виробляються вже не зануренням, а методом опресування на виготовленому своїми силами обладнанні. Однак зростаючим обсягам виробництва ця майстерня вже не задовольняла. Тож у об'єднанні на базі центральної зварювальної лабораторії будується новий електродний цех площею 4 тис. м². Для його оснащення купується найсучасніше на той момент обладнання швейцарської фірми «Манса-Судаж».

Одночасно фірма «Манса-Судаж» поставила лабораторний комплекс обладнання. Фактично це електродний цех у мініатюрі для виготовлення та випробування дослідних партій електродів перед виробництвом великих партій. Все це дозволило створити сучасне виробництво різних типів елек-

тродів високої якості, широкої номенклатури з повним циклом сертифікатних випробувань.

У цей же час завод спільно з Інститутом електрозварювання одним із перших розпочинає успішне впровадження технології напівавтоматичного зварювання під шаром флюсу.

З 1950-х р. стрімко розвивається космічна галузь. Активними учасниками процесу стали сумські машинобудівники, яким доручили виготовляти обладнання для космодромів Байконур та Плесецьк. Ферми, стріли, різні системи газів, повітря, вакуумування, заправники паливом, барокамери – це та багато іншого було зроблено та змонтовано на цих об'єктах із застосуванням зварювальних електродів сумського підприємства «СУМИ-ЕЛЕКТРОД».

З 1960-х р. освоюється технологія автоматичного зварювання алюмінію під шаром флюсу. Особливий внесок у розвиток цієї технології внесли співробітники відділу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, керованого д.т.н. Д.М. Рабкіним. У той же час у співпраці з відділом д.т.н. А.М. Макари було освоєно надійну стабільно повторювану технологію зварювання роторів центрифуг з високоміцної сталі 30ХГСА.

У міру розширення та розвитку заводу розвивалося і зварювальне виробництво, що стало одним із центрів розвитку інноваційної потужності підприємства. У кожному новому цеху були спеціалізовані зварювальні ділянки, що оснащувалися найбільш передовою на ті часи технікою, а фахівці науково-виробничого центру зварювання спільно зі співробітниками Інституту електрозварюван-

ня відпрацьовували нові інноваційні технології зварювання перед запуском їх в основне виробництво. Ця співпраця дала швидку віддачу у вигляді впровадження інноваційних технологій зварювання хімічного обладнання з високолегованих сталей та сплавів. Так, було освоєно виготовлення колонного масообмінного обладнання з різними видами контактних елементів: ковпачковими, клапанними, сітчастими, жалюзійними, комбінованими та вихровими тарілками. Було освоєно технологію автоматичного зварювання колонного обладнання під флюсом. Освоюються технології зварювання теплообмінного обладнання із високолегованих сталей із забезпеченням корозійної стійкості зварних з'єднань до агресивних середовищ, що працюють у широкому діапазоні екстремальних температур (від -253°C до 1000°C) та знакозмінних навантажень.

Спільно з фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона М.І. Каховським, В.Г. Фартушним, К.А. Ющенком було вирішено питання досягнення необхідного рівня технологічної міцності аустенітних швів та зони термічного впливу, а також досягнуто необхідних значень холодостійкості, теплостійкості та жароміцності з'єднань. Для нових конструкційних матеріалів розроблялися технології зварювання, засоби механізації та автоматизації зварювального процесу. Так, було впроваджено імпульсно-дугове зварювання з електромагнітним перемішуванням зварювальної ван-

ни, що у поєднанні з іншими технологічними рішеннями дозволило механізувати зварювання виробів з аустенітних сталей типу ЭИ-943 та нікелевих сплавів типу хастелой. Завдяки впровадженим технологічним рішенням вдалося збільшити термін служби обладнання, що виготовляється, в 2...3 рази.

У цей час освоюється технологія зварювання титану та його сплавів. Зіткнувшись із труднощами, пов'язаними з високою активністю титану до кисню, фахівці підприємства вирішили всі виробничі завдання, забезпечивши на десятиліття конкурентні переваги підприємства та країни як у військовій промисловості, так і в народному господарстві. Досягнутий рівень технологій був настільки високий, що навіть у 2000-х р. американські фахівці були захоплені досягненнями підприємства тих часів.

З 1963 р. було освоєно технологію автоматичного електрошлакового зварювання (ЕШЗ) поздовжніх та кільцевих стиків товстостінного обладнання. Спільно з Інститутом електрозварювання вирішено технологічні питання ЕШЗ високоміцних сталей, які пов'язані зі схильністю зварних з'єднань до утворення холодних тріщин та забезпечення необхідних механічних властивостей. Пізніше було освоєно технології ЕШЗ рам газоперекачувальних агрегатів (ГПА), товстостінних пелюсткових днищ та розроблено технологію електрошлакового лиття патрубків ГПА безпосередньо на корпусі нагнітачів.

До 1970 р. підприємство стало світовим лідером за рівнем та обсягом застосування зварювання в технологічних процесах виготовлення промислового обладнання.

У ці роки світова політична обстановка вимагала багаторазового збільшення виробництва гелію. Поставлене завдання було виконано фахівцями підприємства. Було спроектовано та побудовано Оренбурзький гелієвий завод, комплектну технологічну лінію з переробки газу для отримання гелієвого концентрату та тонкого очищення гелію продуктивністю 3 млрд м³ гелію на рік. Для



цього спільно з Інститутом електрозварювання та ЦНДІ «Прометей» було розроблено технологію механізованого зварювання під флюсом товсто-стінного колонного обладнання зі сталей АК-25 та АК-27, що працюють в умовах екстремально низьких температур, високого тиску та знакозмінних навантажень, а також супутніх технологій, таких, як плакування трубних решіток стрічковим електродом та енергією вибуху, елетрогідроімпульсного розвальцювання труб, об'ємної термообробки великогабаритних вузлів та багато інших. Надалі сумчани поставили Оренбурзькому заводу ще п'ять установок із виробництва гелію.

Після запровадження санкцій США на постачання ГПА та комплектуючих до них завдяки зусиллям Генерального директора В.М. Лук'яненка Сумське науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе стало базовим підприємством для освоєння виробництва вітчизняних ГПА та отримало необхідні ресурси та фінансування.

Були освоєні технології багатоелектродного електрошлакового приварювання мундштуком, що плавиться, квадратних патрубків до циліндричного корпусу нагнітача, технологія електрошлакового зварювання кільцевих і поздовжніх швів корпусів нагнітача. Під керівництвом академіка Б.І. Медовара було розроблено технологію електрошлакового переплаву для виробництва сталей особливої чистоти із заданими хімічними та технологічними характеристиками. Спільно з Інститутом електрозварювання були розроблені передові технології зварювання робочих коліс



ГПА зі сталі 13ХГМРБ із застосуванням напівавтоматичного зварювання замість дорогої технології вакуумного паяння.

1965–1975 рр. у розвитку заводу можна охарактеризувати як період найбільш інтенсивного зростання номенклатури та обсягів випуску хімічного обладнання та подальшого технічного оснащення виробництва. У ці роки вирішувалося поставлене урядом завдання з хімізації народного господарства країни, для чого потрібно було різко збільшити темпи розвитку галузі хімічного машинобудування.

Розвиток та створення нових хімічних виробництв та обладнання для них вимагало застосування нових матеріалів, насамперед складнолегованих сталей та спеціальних сплавів. Перед заводом постають одна за одною проблеми створення апаратури з корозійностійких та висо-



комісних сталей, хастелою, двошарових сталей. Спільно з фахівцями науково-дослідних інститутів Києва, Москви, Ленінграда, Волгограда створюються та успішно впроваджуються нові технології зварювання цих матеріалів. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» освоєло випуск таких електродів, як ОЗЛ-17У, ЗИФ-10, ЦЛ-11, АНВ-13, АНВ-17, НЖ-13, ЭА-400/10У, ОЗЛ-6, ЗИФ-5, ЗИФ -11.

Відповідно розвитку номенклатури продукції, що випускається заводом, розширювався і спектр зварювальних електродів. Для виготовлення обладнання, що є великогабаритними цільнозварними апаратами, були розроблені електроди марки ЗИФ-8, що забезпечують працездатність зварних швів при $t = -196^\circ\text{C}$. Фахівцями підприємства були забезпечені потреби нафтогазової промисловості півночі у пересувних заправниках. Так, було розроблено та освоєно технології автоматичного зварювання під флюсом низьколегованими зварювальними матеріалами сталі АБ1-Ш товщиною 60 мм, що працює під тиском понад 32 МПа.

Після включення до складу об'єднання заводу атомного та енергетичного насособудування було освоєно технологію зварювання уліток головного циркуляційного насосу першого контуру АЕС та іншого станційного обладнання, що потребує особливого підходу до забезпечення якості зварних з'єднань. Перші насоси для атомних електростанцій на підприємстві були створені ще у 1959 р. Масове їх виробництво стартувало з початку 1980-х р. і потребувало використання зварюваль-

них електродів найвищої якості та найрізноманітнішої номенклатури: для зварювання вуглецевих, теплостійких, високолегованих жаромісних і жаростійких, різнорідних сталей.

З 1988 по 1993 рр. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» випускало зварювальні електроди для енергетичного та атомного машинобудування під контролем Держатоменергонагляду СРСР.

У рамках проекту із запуску у 2011 р. ракети «Союз-СТ» у Французькій Гвіані завод ім. М.В. Фрунзе створював обладнання для стартової системи: стріли, ферми, сектори та інші супутні механізми. Тут також були використані зварювальні електроди ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД», проте варто зазначити, що обладнання для Гвіанського центру було виготовлено за більш жорсткими стандартами якості, що потребувало підвищення якості зварювальних електродів.

За цей час підприємство опанувало кілька поколінь обладнання для автоматичного зварювання – від наднадійного зварювального трактора ТС-17 розробки Інституту електрозварювання до зварювальних роботів.

Сумське науково-виробниче об'єднання перше у СРСР освоїло у виробництві одразу 27 одиниць зварювальних колон для автоматичного зварювання виробництва «Дойма» (Німеччина) та зварювальної колони виробництва «Бреда» (Італія) для об'ємного зварювання. Освоєно устаткування для автоматичного зварювання під флюсом товсто-стінного обладнання розщепленою дугою.

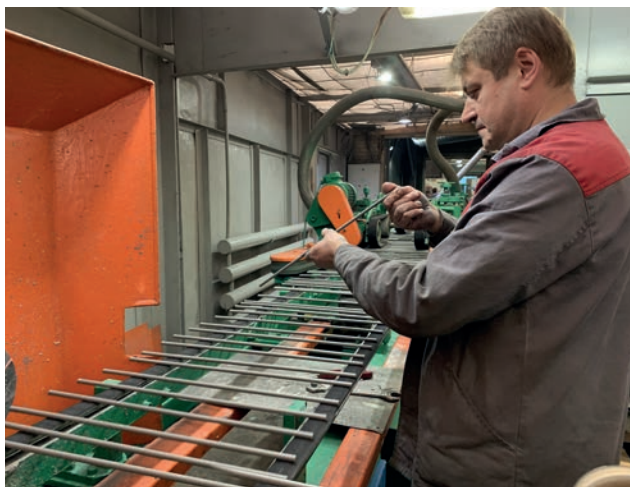
Найбільшу гордість викликає реалізація технології автоматичного зварювання під час виготовлення наступних виробничих замовлень:

- штамповано-зварні корпуси шарової арматури діаметром 300...1400 мм;
- ємнісне обладнання для газової промисловості товщиною до 260 мм і діаметром до 3500 мм;
- корпуси ГПА товщиною до 120 мм і діаметром до 1400 мм;
- зварні улітки ГЦН зі сталі 06Х12Н3Д товщиною до 200 мм;
- наплавлення та приварювання патрубків до корпусів ГПА;
- центрифуги зі сталей 12Х18Н10Т, 0Х17М13М3Т та ін.;
- пересувні автогазозаправні станції;
- зварювання труб в трубні решітки камерного типу через отвір;
- обладнання для заводів з виплавлення алюмінію.

– пенали і транспортно-пакувальні контейнери для зберігання відпрацьованого ядерного палива.

З 2019 р. підприємство перейменовано в АТ «СМНВО – Інжиніринг». Колектив підприємства докладає всіх можливих зусиль для відновлення





виробництва після наслідків рейдерського захоплення. Ядро фахівців, що залишилося, зберегло обладнання і технології, на ґрунті яких стало можливим повернення фахівців і відродження виробничих потужностей підприємства.

В області автоматичного зварювання заплановано впровадження робототехнічного зварювального комплексу з можливістю отримання зварних швів із заданими механічними властивостями і відображенням структури зварного шва в реальному часі. Даний проект планується реалізувати спільно з фахівцями відділу автоматизованих систем управління технологічними процесами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона.

В області систем управління продовжується впровадження системи автоматичного обліку витрат SAP ERP. У планах – запровадити автоматичний контроль і облік витрат зварювального виробництва із застосуванням сучасного зварювального обладнання. Триває активна співпраця з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона в рамках раніше укладеного Меморандуму.

У молодого покоління фахівців в області зварювання є чітке розуміння того, що конкурентна боротьба виграється інноваційним потенціалом підприємства і робиться все можливе для реалізації цього потенціалу.

Зварювальне виробництво АТ «СМНВО – Інжиніринг» атестовано на відповідність більшості міжнародних стандартів в галузі забезпечення якості. Так, триває успішна співпраця з Американським товариством інженерів-механіків (ASME), Американським інститутом нафти (API), Міжнародним інститутом зварювання (IIW). Внутрішня нормативна документація зварювального виробництва підприємства гармонізована з більшістю міжнародних стандартів, таких як ISO 3834, ASME IX; API 6D; AWS D 1.1 та ін. Координатори в галузі зварювання атестовані відповідно до вимог більшості міжнародних стандартів, що діють на території України, ЄС, США та Митного Союзу.



Сьогодні якість продукції ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» підтверджено сертифікатами Канадського бюро зварювання (CWV Group), TÜV Rheinland, Bureau Veritas, Регістром судноплавства України, Російським морським регістром судноплавства. Також компанія має дозвіл на поставку зварювальних матеріалів для ДП «НАЕК Енергоатом».

Серед наших клієнтів багато теплостанцій ДТЕК, підприємства ДП «НАЕК Енергоатом», Укроборонпрому, а також машинобудівні та виробничі компанії, серед яких Турбоатом, НКМЗ, ЗТМК, Арселор Міттал, Нібулон. Зараз продукція компанії поставляється в більш ніж 20 країн світу і застосовується для найвідповідальніших конструкцій. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» успішно конкурує з кращими світовими брендами за якістю продукції.

Широке застосування отримують електроди власної розробки SF 7016 (аналог LB-52U) і SF 7018 (аналог FOX EV 50), призначені для зварювання поворотних і неповоротних стиків труб магістральних і промислових трубопроводів.

Номенклатура продукції ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» налічує близько 200 марок, серед яких електроди для зварювання вуглецевих сталей, низьколегованих і теплостійких сталей, високолегованих корозійностійких жаростійких і жароміцних сталей, нікелевих сплавів, електроди для зварювання чавуну, міді. Також ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» випускає електроди для наплавлення поверхневих шарів зі спеціальними властивостями.

Підприємство має багаторічний досвід поставок різних марок електродів по всьому світу і готове прийняти та виконати будь-яке замовлення на виготовлення зварювальних електродів за індивідуальними вимогами.

Отроков В.В., Погрібний П.М.,
Понамарьов І.В., Яковенко Є.М.

ВПЛИВ ФОРСОВАНОГО РЕЖИМУ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ КЛАСУ МІЦНОСТІ С440

А.В. Завдовсєв¹, В.Д. Позняков¹, М. Rogante², С.Л. Жданов¹, Т.Г. Соломийчук¹, О.А. Шишкевич¹

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

²Rogante Engineering Office, 62012 Civitanova Marche, Italy

В роботі проведено дослідження впливу імпульсно-дугового форсованого зварювання на формування структури та властивості металу швів і ЗТВ в порівнянні зі стандартним імпульсно-дуговим зварюванням. На прикладі високоміцної сталі S460M показано, що імпульсно-дугове форсоване зварювання дозволяє ефективно регулювати структуроутворення. Зміна ТЦЗ, а саме прискорений нагрів та уповільнене охолодження, призводить до формування у шві та ЗТВ оптимальної структури, яка дозволяє отримати високі показники міцності і опірності крихкому руйнуванню. Переваги імпульсно-дугового форсованого зварювання дозволяють проводити зварювання без розробки кромок, що суттєво підвищує продуктивність процесу в цілому. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: імпульсно-дугове зварювання, високоміцна сталь, метал шва та ЗТВ, термодформаційний цикл, структура, властивості зварних з'єднань

Останніми роками спостерігається безперервне зростання частки зварних конструкцій, виготовлених зі сталей із збільшеною міцністю. Вимоги до якості у багатьох галузях, таких як суднобудування, цивільне будівництво, гідроенергетика, тощо диктують нові правила щодо розробки технологій зварювання металоконструкцій зі збереженням високого комплексу експлуатаційних властивостей [1–5]. Одночасне збільшення як механічних властивостей, так і пластичності може бути досягнуто додаванням мікролегуючих елементів до сталей. Вивільнені дисперсійні карбіди та карбонітриди мікролегуючих елементів зменшують розмір зерен або блокуючи міграцію границь зерен аустеніту, або затримуючи його перекристалізацію. Як наслідок, вміст вуглецю можна зменшити в мікролегованих сталях і, таким чином, покращити їх зварюваність, на відміну від ситуації, яка має місце з високоміцними марками сталі С–Mn.

Подальшого збільшення межі пластичності конструкційних сталей можна досягти за допомогою спеціального методу прокатки, що включає термомеханічну обробку. Це вимагає систематичного контролю як температури, так і ступеня деформації під час формування металу.

Термомеханічна обробка вимагає, щоб процес прокатки проводився таким чином, щоб окремі стадії деформації сталі проходили при заданих температурах. Тут використовуються два основні ефекти:

– вплив, який має дрібнозерниста структура на поліпшення механічних властивостей і збільшення ударної міцності;

– обмеження або затримка перекристалізації, що досягається введеними мікролегуючими елементами (Nb, Ti).

Термомеханічно оброблені сталі з високим рівнем міцності і відносно низьким вуглецевим еквівалентом значно спрощують вирішення проблеми поліпшення якості та надійності металевих конструкцій. Разом з тим це ставить нові питання у перерізі технологій зварювання таких сталей. А саме, одного тільки вуглецевого еквіваленту вже недостатньо для досліджень зварюваності термомеханічно оброблених сталей. В першу чергу це зумовлено особливостями структурного стану таких сталей, що ніяк не враховується вуглецевим еквівалентом. Технічний та економічні аспекти, що впливають із можливості робити вироби з цих сталей та застосування їх в енергоефективних виробництвах, а також їх придатність для будівництва різних конструкцій, в тому числі діючих в екстремальних кліматичних умовах, мають велике значення для матеріалознавства. Пов'язані з цією групою сталей питання з метою вдосконалення технологій, що використовуються для виготовлення металоконструкцій з цих сталей методами зварювання потребують вирішення. Одним з перспективних шляхів у вирішенні проблем зварюваності термомеханічно оброблених сталей є застосування імпульсно-дугового зварювання (ІДЗ), яке дозволяє керувати режимами та термічними циклами зварювання у широких діапазонах [6–11]. У попередніх дослідженнях застосування ІДЗ до термомеханічно зміцненої сталі S460M [12] показали перспективність використання цього

Завдовсєв А.В. – <http://orcid.org/0000-0003-2811-0765>, Позняков В.Д. – <http://orcid.org/0000-0001-8581-3526>,

М. Rogante <http://orcid.org/0000-0002-6846-0826>

© А.В. Завдовсєв, В.Д. Позняков, М. Rogante, С.Л. Жданов, Т.Г. Соломийчук, О.А. Шишкевич, 2021

го методу. Разом з тим існує необхідність подальшого вдосконалення технологічного процесу зварювання термомеханічно зміцнених сталей, а саме зменшення шкідливого впливу термічного циклу зварювання на зону термічного впливу та підвищення продуктивності процесу. Для вирішення цих завдань у представленій роботі пропонується використання ІДЗ на форсованому режимі, який суттєво відрізняється від стандартного. Тому, для успішного застосування ІДЗ на форсованому режимі в розробці сучасних технологій зварювання, в роботі проведено дослідження впливу режимів цього процесу зварювання на формування структури та властивості металу швів і ЗТВ в порівнянні зі зварюванням дугою, яка горить стаціонарно.

Методика досліджень. В представленій роботі використовувалась термомеханічно зміцнена сталь S460M [12] (клас міцності C440), виготовлена згідно ДСТУ EN 10025-4:2007. Хімічний склад сталі S460M, мас. %: 0,15 C; 0,23 Si; 1,3 Mn; 0,09 Cr; 0,019 Ni; 0,01 V; 0,05 Nb; 0,025 Al; 0,013 S та 0,017 P.

В якості джерела живлення використовувався випрямляч інверторного типу марки ewm Phoenix Pulse 401 (фірми «MULTIMATRIX»), який забезпечує різну частоту проходження імпульсів при ІДЗ [12]. Для визначення зварювально-технологічних характеристик джерела струму було використано цифровий осцилограф UTD2000CEX-II, який дозволяє проводити фіксацію вольт-амперної характеристики джерела живлення в широких діапазонах. Для запису осцилограм використовували шунт 75ШСМ, який має опір 150 мкОм. Це дозволило реєструвати струми зварювання до 500 А, при цьому падіння напруги на шунті дорівнювало 75 мВ.

Для базового порівняльного зразка, як і в попередніх дослідженнях [12], використовували зварювання в захисних газах ($\text{Ar}+18\% \text{CO}_2$) з'єднань сталі S460M товщиною 16 мм з V-подібним розкриттям кромки дротом суцільного перерізу G3Si1 діаметром 1,2 мм (рис. 1, а). Кореневі проходи при зварюванні цієї сталі виконували на мідній підкладці. Режим автоматизованого ІДЗ був наступним: $I_{\text{ср}} = 220 \dots 240 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 26 \dots 28 \text{ В}$, $V_{\text{зв}} = 14 \dots 21 \text{ м/год}$. У даному випадку, де I_{i} – струм в імпульсі (450 А), $I_{\text{п}}$ – струм в паузі (160 А), t_{i} та $t_{\text{п}}$ – тривалість імпульсу та паузи відповідно. Дослідні зразки з використанням ІДЗ на форсованому режимі виконувались для стикових з'єднань без розробки кромки: $I_{\text{ср}} = 320 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 28 \text{ В}$, $V_{\text{зв}} = 18 \text{ м/год}$. Слід зазначити, що в цьому випадку було забезпечено якісне формування шва з повним проваром (рис. 1, б), що є неможливим у випадку використання традиційного процесу зварювання.

З метою дослідження впливу режимів ІДЗ на термічні цикли зварювання було проведено відповідні експерименти. Для фіксації ТЦЗ використовували сталеві пластини товщиною 10 мм (рис. 2), в які всвердлювали хромель-алюмелеві термопари на глибину 7,5...8,0 мм. Така величина глибини всвердлювання ґрунтується на попередніх дослідженнях та зумовлена необхідністю реєстрації ТЦЗ саме на ділянці ЗТВ.

Металографічні дослідження проводилися за допомогою растрового електронного мікроскопу на MIRA 3 LMU (Tescan). При дослідженні використовувались детектор вторинних електронів (позначення SE на електронному знімку) та детектор пружньовідбитих електронів (позначення BSE на електронному знімку). Для оцінки елементного складу під час дослідження використовувалися детектор-спектрометр Oxford X-Max 80 та аналітичний програмний продукт INCA Energy*.

Мікротвердість окремих структурних складових і інтегральну твердість металу вимірювали на твердомірі М-400 фірми «LECO» при навантаженні 100 г (HV). Зразки для металографічних досліджень підготовлювали за стандартними методиками із застосуванням алмазних паст різної дисперсності, виявлення мікроструктури викону-

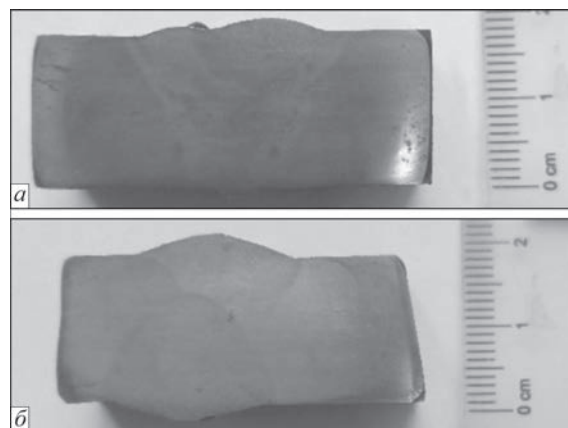


Рис. 1. Макрошліфи зразків стикових з'єднань, виконаних ІДЗ (а) та ІДЗ на форсованому режимі (б)



Рис. 2. Оснастка для фіксації термічних циклів зварювання

* Автори висловлюють подяку В.А. Костіну за сприяння у проведенні металографічних досліджень

вали методом хімічного травлення у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти.

Для проведення механічних випробувань металу швів і ЗТВ із зварних з'єднань виготовляли стандартні зразки. Зразки для випробувань на статичний (короточасний) розтяг відповідали типу II відповідно до ГОСТ 6996-96. За результатами проведених випробувань оцінювали вплив способу зварювання на зміну наступних показників металу ЗТВ: міцності (σ_T і σ_B , МПа), пластичності (δ_5 і ψ , %).

Здатність металу опиратися крихкому руйнуванню визначали з використанням підходів з механіки руйнування. Значення критеріїв K_{IC} та δ_C визначали за стандартними методиками та за формулами, наведеними у роботі [12]. Для визначення значень критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} і критичного розкриття тріщини δ_C

застосовували зразки прямокутного перерізу розміром 10×20×90 мм з надрізом довжиною 7 мм та тріщиною втомі довжиною 3 мм. Ці зразки випробували на трьохточковий вигин у діапазоні температур від 20 до −40 °С.

Результати та їх обговорення. Дослідження зварювально-технологічних характеристик ІДЗ. Поряд із звичайним режимом зварювання, есм Phoenix Pulse 501 має форсований режим ІДЗ. Особливості даного режиму вивчалися, починаючи з осцилограм зміни зварювального струму в залежності від часу. На рис. 3 наведені осцилограми для ІДЗ стандартного та форсованого режимів. Детальний аналіз показав, що частота слідування імпульсів відповідає 58 кГц, і вона відповідає стандартному ІДЗ. Форсований режим відрізняється скважністю імпульсів. Якщо при стандарт-

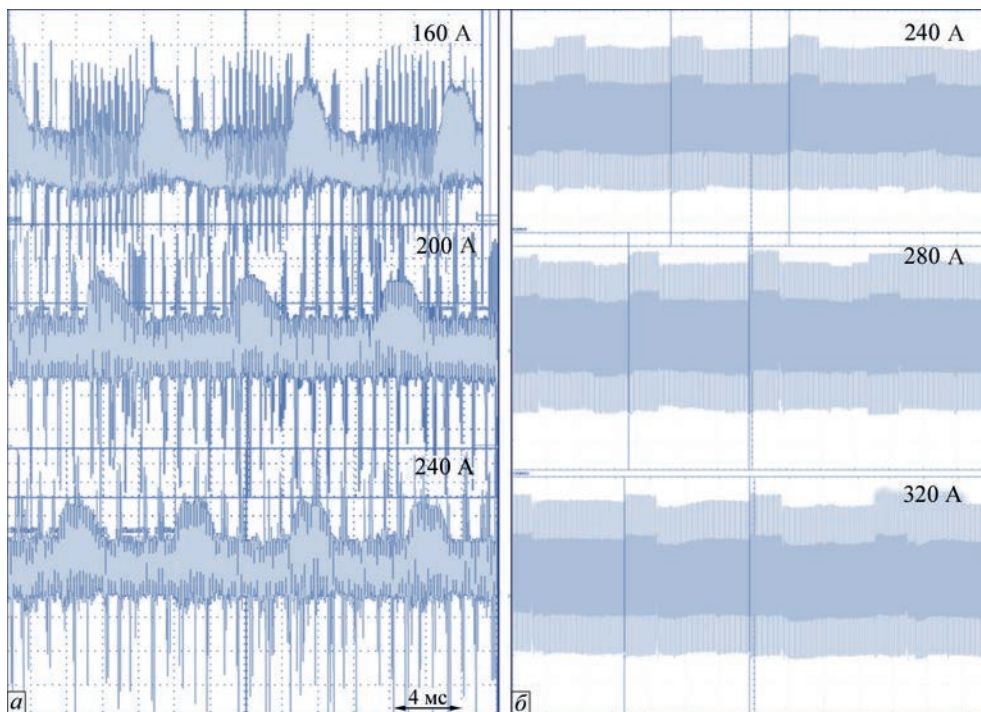


Рис. 3. Осцилограми для інверторного джерела живлення, стандартний імпульсно-дуговий (а) та імпульсно-дуговий форсований режим (б) зварювання

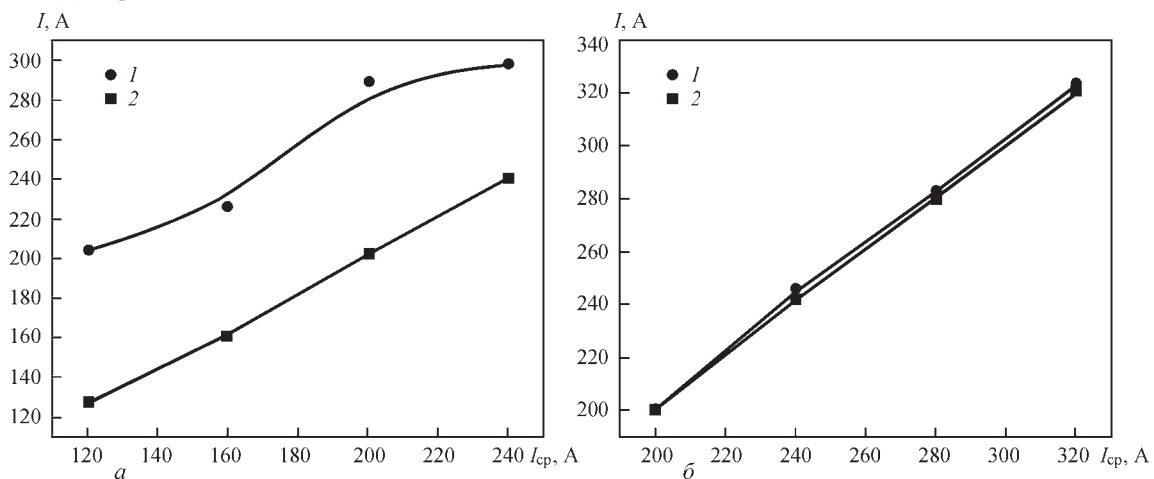


Рис. 4. Залежність ефективного (1) та середнього (2) струмів зварювання, стандартний імпульсно-дуговий (а) та імпульсно-дуговий форсований режим (б) зварювання

ному імпульсно-дуговому режимі з ростом середнього струму зварювання скважність зростає, то у форсованому режимі скважність незмінна, натомість змінюються параметри струмів у імпульсі та у паузі. В імпульсі струм постійний та дорівнює 500 А, а струм паузи з ростом середнього струму зростає. Крім цього, суттєво відрізняється форма імпульсу, а саме, якщо при ІДЗ на стандартному імпульсно-дуговому режимі імпульс має параболічну форму, як було встановлено в роботі [12], то у випадку форсованого режиму – форма імпульсу прямокутна. А ефективний струм зварювання дорівнює середньому струму зварювання, в той час як при ІДЗ на стандартному режимі ефективний струм зварювання на 25 % більший (рис. 4).

Дослідження структури та властивостей основного металу. Внаслідок проведення контрольованої термомеханічної прокатки в діапазоні температур 900...700 °С з прискореним охолодженням у вихідній структурі сталі S460M утворюється дрібнозерниста полосчата феритно-перлітна структура з розміром зерен близько 20 мкм та твердістю HV 195 (рис. 5).

Така структура сталі S460M вказаного вище хімічного складу забезпечує наступний рівень меха-

нічних властивостей: межа плинності $\sigma_{0.2} = 452$ МПа, межа міцності $\sigma_b = 581$ МПа, відносне подовження $\delta_5 = 26$ %, відносне звуження $\psi = 58$ %.

Металографічні дослідження структури (рис. 6) зварних з'єднань сталі S460M, які було виконано в попередній роботі [12], свідчать, що при ІДЗ мікроструктура металу шва складається з подрібнених пластини голчастого фериту (1...3 мкм) і зменшеною кількістю поліедрично-

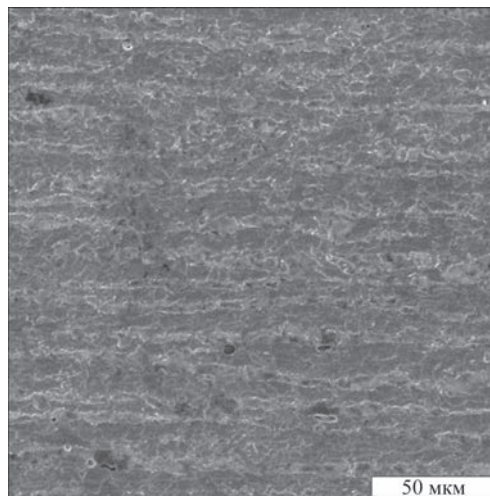


Рис. 5. Мікроструктура сталі S460M

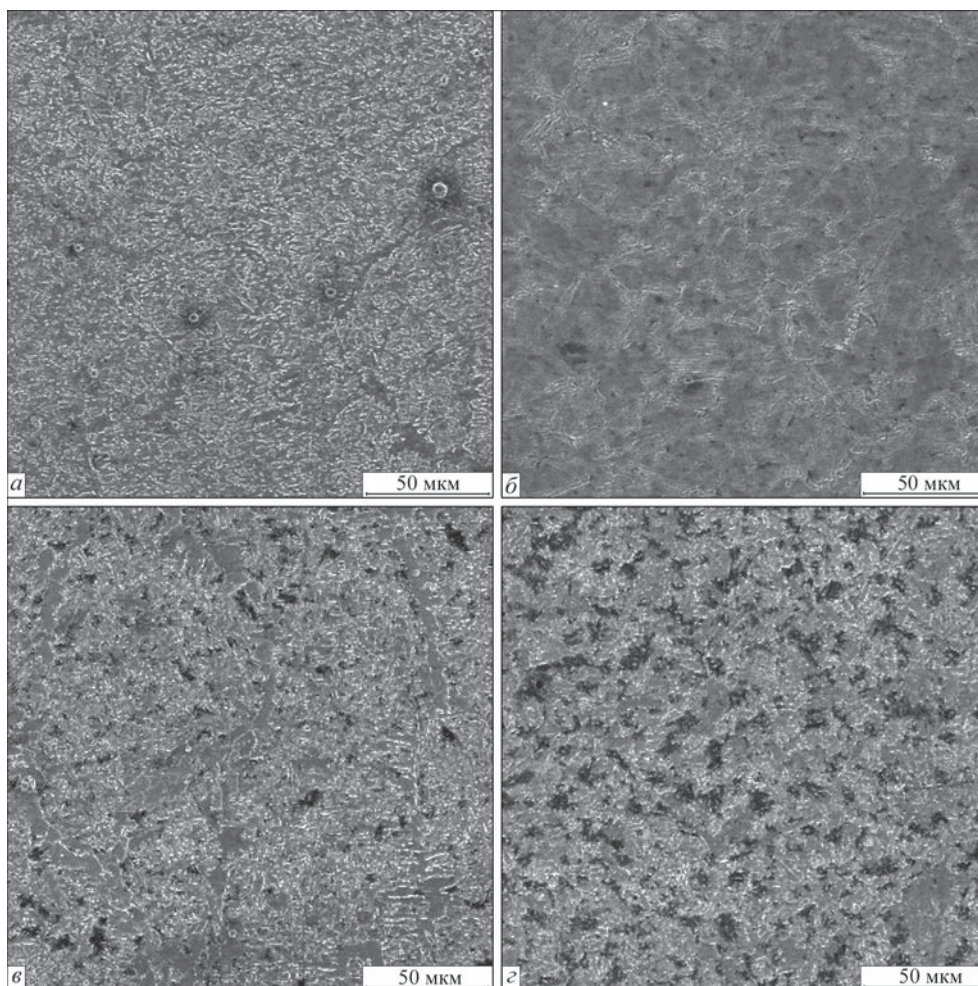


Рис. 6. Мікроструктура металу шва (а, в) та ЗТВ (б, г) сталі S460M, виконаних імпульсно-дуговим (а, б) та імпульсно-дуговим форсованим (в, г) зварюванням

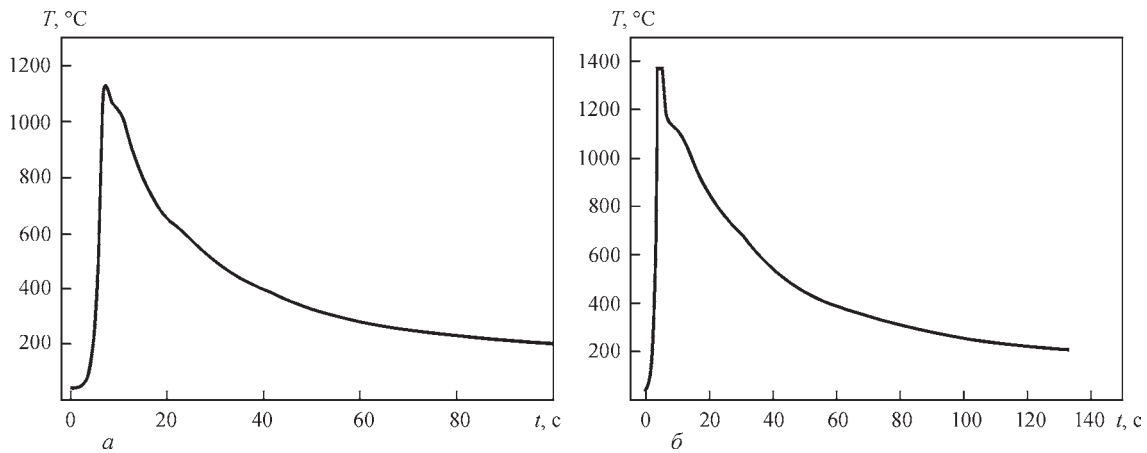


Рис. 7. Термічні цикли зварювання для ІДЗ (а) та ІДЗ на форсованому режимі (б)

го фериту (5...10 %) та виділеннями полігонального фериту (3...10 мкм), що розташований по межах первинних аустенітних зерен. Такі зміни мікроструктури призводять до підвищення в шві твердості до 2420 МПа у порівнянні з основним металом. На ділянці крупного зерна ЗТВ спостерігається переважно бейнітна структура з незначною часткою (до 3...5 %) мартенситу. Твердість цієї ділянки ЗТВ відповідно підвищується до 3250...3340 МПа. Структура ділянки дрібного зерна ЗТВ складається з суміші верхнього та нижнього бейніту (2650...2810 МПа). На ділянці неповної перекристалізації ЗТВ спостерігається перліт і ферит, що істотно знижує твердість металу по Вікерсу до 2320...2400 МПа.

При ІДЗ на форсованому режимі мікроструктура металу шва істотно відрізняється від мікроструктури металу шва, виконаного стандартним ІДЗ, а саме: спостерігається голчастий ферит з більш крупними пластинами, а виділення полігонального фериту стали ширше та їх питома доля збільшилась. Внаслідок цього в металі спостерігається зниження мікротвердості до 2050 МПа. На ділянці крупного зерна ЗТВ спостерігається переважно голчастий ферит з впорядкованою другою фазою. Твердість цієї ділянки ЗТВ відповідно дорівнює 2400...2480 МПа. На ділянці неповної перекристалізації ЗТВ спостерігається утворення перліту і фериту, що істотно знижує твердість у неї до 2160 МПа.

Такі відмінності мікроструктури зумовлені особливостями протікання ТЦЗ при ІДЗ (рис. 7). За рахунок того, що при ІДЗ температура металу вище 1000 °С, швидкість охолодження при цьому буде набагато вище, що призводить до формування у структурі мартенситної складової. При ІДЗ температура металу нижче 1000 °С, швидкість охолодження металу ЗТВ нижче, ніж у дугового зварювання, що сприяє протіканню дифузійних процесів під час структурних перетворень.

При імпульсно-дугових процесах зварювання, як зазначається автором роботи [11], ТЦЗ грає

ключову роль при твердінні металу шва, оскільки впливає на подрібнення структурних складових за рахунок впливу на процеси кристалізації у зварювальній ванні.

Дослідження твердості (рис. 8) зварних з'єднань дозволило встановити, що при форсованому ІДЗ її рівень в металі шва менше на 15 % від твердості металу шва, виконаного стандартним ІДЗ. Це зумовлено особливостями формування структури. У металі ЗТВ значення твердості при імпульсно-дуговому форсованому зварюванні також нижчі ніж при стандартному ІДЗ. Цей факт є додатковою перевагою форсованого ІДЗ, оскільки в зварному з'єднанні буде формуватися однорідний розподіл механічних властивостей. Слід зазначити, що при форсованому ІДЗ твердість у ЗТВ спадає до рівня вихідного металу повільніше.

З наведених у таблиці даних видно, що за умов ІДЗ досягаються більші значення міцності металу шва у порівнянні з основним металом. Пластичність при цьому лишається на достатньо високому рівні. Значення міцності металу шва добре узгоджуються з показниками твердості для ділянки металу шва, а саме, не перевищують значення основного металу більше ніж на 20 %. При викорис-

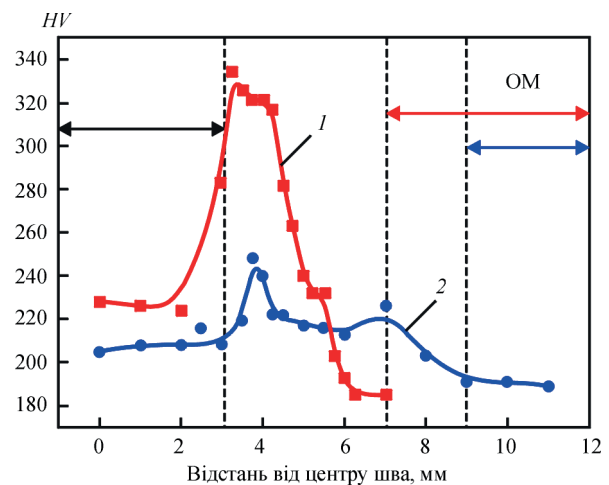


Рис. 8. Твердість зварних з'єднань сталі S460M при ІДЗ (1) та ІДЗ на форсованому режимі (2)

Механічні властивості металу шва з'єднань сталі S460M при різних способах зварювання

Ділянка	Спосіб зварювання	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ	ψ
Шов	ІДЗ	570	667	24	68
	ІДЗ на форсованому режимі	590	675	23	55
ОМ		452	581	26	60

танні форсованого ІДЗ, враховуючи, що твердість металу ЗТВ має значення не більші за 20...25 % від основного металу, це забезпечує рівномірність зварного з'єднання.

Для оцінки чутливості ділянок металу зварних з'єднань до концентрації напружень в умовах плоскої деформації при статичному навантаженні використовується силовий критерій – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} . При підвищенні значень K_{IC} чутливість металу до концентрації напружень знижується. Деформаційні критерії руйнування застосовуються для визначення тріщинозміцненості матеріалів руйнування, що супроводжується значними пластичними деформаціями на ділянці біля вершини тріщини та передують її поширенню. Цей критерій має назву критичне розкриття вершини тріщини – δ_c . Якщо розкриття берегів є більшим за δ_c , то напруження зчеплення дорівнюють нулю. За його допомогою здійснюється оцінка опору металу крихкому руйнуванню в умовах великої пластичної деформації, коли тріщина у своїй вершині досягає критичних розмірів значення δ_c і починає швидко розповсюджуватися, використовуючи енергію, що вивільняється при подальшому її зростанні. Показники опірності крихкому руйнуванню металу ЗТВ зварних з'єднань, виконаних стандартним ($K_{\text{IC}}=100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\delta_c=0,11 \text{ мм}$) та форсованим ($K_{\text{IC}}=100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\delta_c=0,18 \text{ мм}$) ІДЗ, майже рівні та знаходяться на достатньо високому рівні, що зумовлено особливостями формування структури.

Висновки

Виконані дослідження впливу стандартного та форсованого ІДЗ на структуру та механічні властивості термомеханічно обробленої сталі S460M дозволили встановити наступні переваги останнього:

– в порівнянні зі стандартним ІДЗ, форсоване дозволяє проведення зварювання без розробки кромки з отриманням якісного зварного з'єднання;

– на 30 % менші значення мікротвердості в зоні термічного впливу зварного з'єднання у порівнянні зі стандартним ІДЗ зумовлено особливостями термічного циклу зварювання;

– на 15 % менші значення мікротвердості металу шва у порівнянні із стандартним ІДЗ та близькі до значень основного металу, що забезпечується формуванням сприятливої мікроструктури;

– високий рівень опірності крихкому руйнуванню зварних з'єднань.

Зазначені особливості форсованого імпульсно-дугового зварювання дозволяють забезпечити високі механічні властивості зварних з'єднань термомеханічно зміцненої сталі S460M, що для такого класу сталей є головною задачею. Продemonстровано, що можливість проведення форсованого ІДЗ без розробки кромки, крім цього, дозволяє підвищити продуктивність процесу на 40 %.

Список літератури/References

1. Lee, C.H., Shin, H.S., Park, K.T. (2012) Evaluation of high strength TMCP steel weld for use in cold regions. *J. Constr. Steel Res.*, 74, 134–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.02.012>.
2. Medina, S.F., Gómez, M., Gómez, P.P. (2010) Effects of v and Nb on static recrystallisation of austenite and precipitate size in microalloyed steels. *J. Mater. Sci.*, 45, 5553–5557. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4616-z>.
3. Fossaert, C., Rees, G., Maurickx, T., Bhadeshia, H.K.D.H. (1995) The effect of niobium on the hardenability of microalloyed austenite. *Metall. Mater. Trans. A.*, 26, 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02669791>.
4. Nazarov, A.V., Yakushev, E.V., Shabalov, I.P. et al. (2014) Comparison of weldability of high-strength pipe steels microalloyed with niobium, niobium and vanadium. *Metallurgist*, 7, 911–917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9821-6>.
5. Zavdoveev, A., Poznyakov, V., Baudin, T. et al. (2021) Welding Thermal Cycle Impact on the Microstructure and Mechanical Properties of Thermo-Mechanical Control Process Steels. *Steel research international*, 92(6), p.2000645.
6. Needham, J.C., Carter, A.W. (1965) Material transfer characteristics with pulsed current. *Brit. Weld. J.*, 5, 229–241.
7. Palani, P.K., Murugan, N. (2006) Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 1–10.
8. Tong, H., Ueyama, T. et al. (2001) Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 6 (4), 203–208.
9. Позняков В.Д., Завдовеев А.В., Гайваронский А.А. и др. (2018) Влияние режимов импульсно-дуговой сварки на параметры металла шва и ЗТВ сварных соединений, выполненных проволокой Св-08Х20Н9Г7Т. *Автоматическая сварка*, 9, 9–16.
10. Poznyakov, V.D., Zavdoveev, A.V., Gajvoronsky, A.A. et al. (2018) Effect of pulsed-arc welding modes on the parameters of welded joints produced with Sv-08Kh20N9G7T wire. *The Paton Welding J.*, 9, 7–12.
11. Amin, M., Ahmed, N. (1987) Synergic control in MIG welding 2-power current controllers for steady dc open arc operation. *Met. Construct.*, 6, 331–340.
12. Rajasekaran, S. (1999) Weld bead characteristics in pulsed GMA welding of Al–Mg alloys. *Weld. J.*, 78 (12), 397–407.
13. Завдовеев А.В., Позняков В.Д., Роганте М. та ін. (2020) Особливості формування структури і властивості з'єднань сталі S460M, виконаних імпульсно-дуговим зварюванням. *Автоматичне зварювання*, 6, 11–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.06.02>
14. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Rogante, M. et al. (2020) Features of structure formation and properties of joints of S460M steel made by pulsed-arc welding. *The Paton Welding J.*, 6, 9–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.06.02>

INFLUENCE OF A FORCED MODE OF PULSE-ARC WELDING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF JOINTS OF STEEL OF THE STRENGTH CLASS C440

A.V. Zavdoveev¹, V.D. Poznyakov¹, M. Rogante², S.L. Zhdanov¹, T.G. Solomiichuk¹, O.A. Shyshkevych¹

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Rogante Engineering Office, 62012 Civitanova Marche, Italy

In the work the influence of a pulsed-arc forced welding on the structure formation and properties of welds and HAZ metal as compared to standard pulsed arc welding was studied. On the example of a high-strength steel S460M, it was shown that a pulsed-arc forced welding can effectively regulate the structural formation. Change in the thermal cycle of welding, namely accelerated heating and delayed cooling, leads to the formation of the optimal structure in the weld and HAZ and, which allows obtaining high strength and resistance to brittle fracture. Advantages of a pulsed-arc forced welding allow welding without edge preparation, which significantly improves the efficiency of the process as a whole. 12 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: pulse-arc welding, high-strength steel, weld and HAZ metal, thermodeformation cycle, structure, properties of welded joints

Надійшла до редакції 30.06.2021

МОЛОДІЖНА МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

26 жовтня 2021 р. Радою молодих вчених Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в онлайн режимі під егідою Міжнародного інституту зварювання була проведена молодіжна міжнародна конференція «Зварювання та споріднені технології» – Young Professionals International Conference on Welding and Related Technologies (YPICandWRTYS 2021 digital). Даний захід об'єднав між собою ювілейну 10 конференцію для молодих науковців «Зварювання та споріднені технології» – WRTYS, яка традиційно проводиться кожні два роки в Києві, та 6 Міжнародну конференцію для молодих спеціалістів в області зварювання – YPIC, яка проводиться щорічно і вже пройшла в таких країнах як Угорщина, Німеччина та Франція. У зв'язку зі світовою пандемією, спричиненою вірусом Covid-19, та карантинними обмеженнями, даний захід був перенесений з 2020-го на 2021-й рік. Проте організувати конференцію в традиційний спосіб на даний час було неможливо, тому оргкомітетом було прийнято рішення провести її в онлайн режимі.

Конференцію було відкрито урочистою промовою директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона академіка НАН України професора І.В. Кривцуна. В своїй промові він відмітив важливість проведення подібних заходів, які сприяють інтеграції молодих спеціалістів до світової спільноти в області зварювання та споріднених технологій.

На конференцію зареєструвалися молоді спеціалісти з України, Німеччини, Бельгії, Казахстану, США, Індії та Мексики. Робочою мовою конференції була англійська. Учасники робили доповіді на таких секціях: «Передові технології в зварюванні та з'єднанні матеріалів», «Аддитивне виробництво, нанесення покриттів та різання», «Інноваційні технології та процеси в металургії», «Міцність зварних конструкцій», «Нові структурно-функціональні матеріали, наноматеріали та композити» та «Чисельне моделювання процесів та матеріалів».

В обговоренні також прийняв участь голова молодих лідерів при Міжнародному інституті зварювання (IIW) – Ернест Леверт (США), який в 2002–2003 рр. був президентом Американської асоціації зварювання (AWS), а зараз займає посаду старшого спеціаліста в одній з провідних компаній оборонної промисловості США – Lockheed-Martin. Після вітальної промови він зробив одну з найцікавіших доповідей, де розповів про зварювання компонентів для Міжнародної космічної станції.

Організаторами конференції відзначено найкращі доповіді: Олександра Хожанова з Східно-Казахстанського технічного університету ім. Д. Серікбаєва на тему: «Дослідження гранулометричного складу та швидкості руху дисперсних частинок цирконієвого дроту під час мікроплазменного наплення», Галини Михайлової з Інституту металознавства ім. Г.В. Курдюмова НАН України на тему: «Зміна властивостей вуглецевих нанотрубок під зовнішнім впливом», Романа Колісника з Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України на тему: «Покращення ефективності нагрівальних елементів для зварювання опором термопластів» та Михайла Ворона з Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України на тему: «Виробництво дрібнокристалічних лігатур на основі алюмінію з використанням технології електронно-променевого лиття».

Рада молодих вчених ІЕЗ ім. Є.О. Патона дякує дирекції свого Інституту, Міжнародному інституту зварювання та всім, хто долучився до організації та участі в конференції «YPIC&WRTYS 2021 digital».

С. Шваб, канд. техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ КОРОЗИЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ AISI 304 З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРА

В.М. Коржик^{1,2}, В.Ю. Хаскін^{1,2}, А.А. Гринюк², Є.В. Ілляшенко², А.В. Бернацький², С.І. Пелешенко³

¹Китайсько-український інститут зварювання Академії наук провінції Гуандун, Гуандунська ключова лабораторія передових зварювальних технологій, Гуанчжоу, Китай

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

³НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

В статті підтверджено наявність синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазера шляхом порівняння площ поперечного перетину проварів, виконаних в пластині AISI 304 ($\delta = 4$ мм) лазерним, плазмовим і гібридним способами при близьких значеннях потужності лазерного випромінювання і плазмової дуги (по ~ 2 кВт). Визначено, що проявлення цього ефекту залежить від швидкості зварювання. При швидкості 2 м/хв перевищення площі перетину гібридного провару суми площин, одержаних лазерним і плазмовим способами, досягає 30 %, а для швидкості 4 м/хв – ~ 20 %. Порівняння погонної енергії лазерного і гібридного процесів зварювання нержавіючої сталі показало, що різниця між ними залежить від товщини зварюваних листів (або глибини провару). Спочатку цей показник зменшується від ~ 100 % для листів з $\delta = 2$ мм до 50 % для листів з $\delta = 6$ мм, а при подальшому збільшенні глибини провару підвищується до 60 %. Характер залежностей фактору відношення площин ϕ , геометрії зварного шва K і глибини проникнення Φ від швидкості гібридного зварювання сталі AISI304 дозволяє рекомендувати діапазон швидкостей 1,5...2,0 м/хв як більш прийнятний за критеріями синергетичного ефекту і глибини проплавлення. Встановлено, що при гібридному зварюванні із використанням випромінювання волоконного лазера плазмова складова сприяє усуненню таких характерних для лазерного зварювання дефектів формування верхнього валику шва, як підрізи та гребінь, тощо. Бібліогр. 19, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: гібридне лазерно-плазмове зварювання, волоконний лазер, нержавіюча сталь, синергетичний ефект, глибина провару, погонна енергія

Часткова (до 50 %) заміна лазерної потужності дуговою в гібридному лазерно-плазмовому процесі при збереженні порівняно невеликої ширини швів може зробити такий спосіб зварювання достатньо привабливим для низки промислових завдань [1]. До таких завдань, наприклад, можна віднести зварювання алюмінієвих панелей для залізничних вагонів і катерів, а також нержавіючих труб для трубопроводів [2]. Через значне зниження вартості обладнання він може вдало конкурувати з лазерним зварюванням, яке на сьогодні отримує все більше розповсюдження. За рахунок підвищення термічної локальності та мінімізації залишкових деформацій порівняно з відомими дуговими способами зварювання, лазерно-плазмове може використовуватися для виготовлення конструкцій з листових матеріалів товщиною до 6 мм і більше. Така задача є актуальною, зокрема, для зварювання нержавіючих сталей при виготовленні конструкцій для хімічної і харчової промисловості [3].

Гібридні процеси лазерно-дугового зварювання приваблюють спеціалістів через низку таких переваг, як наявність синергетичного ефекту, який допомагає зменшити погонну енергію зварюван-

ня, зниження вимог до підготовки крайок під зварювання, модифікація термічного циклу, яка сприяє усуненню структур загартування і підвищенню пластичності з'єднання тощо [4]. При такому типі зварювання дуга стабілізується наявністю сфокусованого лазерного випромінювання. Однак різні довжини хвилі лазерного випромінювання ініціюють різні механізми стабілізації дуги, що призводить до різниці в одержуваних результатах. Це пов'язано зі значною залежністю коефіцієнта об'ємного поглинання κ_0 лазерного випромінювання в дуговій плазмі від довжини його хвилі λ .

В роботі [5] було виявлено, що стабілізуючий ефект дії випромінювання Nd:YAG-лазера можна пояснити двома явищами: поглинанням лазерної енергії плазмою дуги і зміною складу плазми дуги, викликаним сильним випаровуванням матеріалу заготовки. Обидва явища призводять до зниження ефективного потенціалу іонізації плазми і, таким чином, забезпечують більші провідимість і стабільність плазмового каналу. Це стабілізує стовп дуги, сприяє подоланню збурень, викликаних зовнішніми силами, та покращує формування кореня шва. В роботі [6] відмічається, що при використанні в

гібридному процесі короткохвильового ($\lambda \approx 1$ мкм) випромінювання твердотільних (Nd:YAG) або волоконних лазерів поглинання лазерного пучка в дуговій плазмі є малоістотним ($\kappa_{\omega} \sim 1$ м⁻¹). В цьому випадку під впливом висококонцентрованого джерела лазерного нагріву відбувається інтенсивне випаровування металу з поверхні зварювальної ванни, яке значно впливає на склад, теплові, газодинамічні і електромагнітні характеристики плазми дуги і, як наслідок, призводить до зміни її теплової і динамічної взаємодії зі зварюваним металом.

При використанні в гібридних процесах випромінювання CO₂-лазерів ($\lambda = 10,6$ мкм) істотними виявляються обидва механізми взаємодії, а саме: поглинання лазерного випромінювання в плазмі стовпа дуги ($\kappa_{\omega} \sim 100$ м⁻¹ [6]) і випаровування металу з поверхні розплаву під впливом сфокусованого лазерного пучка. В роботі [7] показано, що взаємодія сфокусованого пучка випромінювання CO₂-лазера з плазмою аргонної дуги з тугоплавким катодом призводить до певного зменшення потужності випромінювання, яка доходить до поверхні анода (зварюваної деталі), в результаті часткового поглинання лазерного випромінювання в плазмі стовпа дуги. При цьому рефракція пучка в неоднорідній дуговій плазмі виявляється малоістотною. Потужність, що вкладається в зварюваний метал лазерним пучком при гібридному (CO₂-лазер + TIG) зварюванні, може бути як більше, так і менше потужності, що вводиться в метал при лазерному зварюванні – в залежності від умов поглинання лазерного випромінювання, яке доходить до поверхні металу. Наприклад, формування в зварювальній ванні парогозового каналу сприяє більш ефективному поглинанню лазерного випромінювання, ніж порівняно плоска поверхня розплаву.

Збільшення долі ефективної (тобто такої, що діє на деталь) лазерної потужності при гібридному зварюванні за допомогою CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) може досягатися за рахунок високого вмісту гелію у зварному (захисному) газі. Це сприяє уникненню утворення плазми в зоні зварної ванни, яка поглинає лазерне випромінювання. Високошвидкісне ві-

деоспостереження показало, що випромінювання із довжиною хвилі $\lambda \approx 1$ мкм (Nd:YAG-, дисковий, волоконний лазер) не впливає на електричну дугу так само, як у випадку CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) [8]. Це дозволяє використовувати стандартні газові суміші Ar/CO₂ і спрощує підбір параметрів дугової складової гібридного процесу. Так, в роботі [8] стверджується, що стандартні параметри GMAW можна використовувати в гібридному процесі без істотних коригувань. На рис.1 показано ефект від додавання лазерної потужності 3 кВт до стандартної дуги з плавким електродом. В експерименті виконували наплавлення зі швидкістю 1 м/хв на пластину з низьколегованої вуглецевої сталі дротом Mn4Ni2CrMo (діаметром 1,2 мм), який подався зі швидкістю 9 м/хв з напругою дуги 27,5...33,0 В у захисті газовою сумішшю 98%Ar+2%CO₂. Високошвидкісне відео показало, що у разі додавання випромінювання волоконного лазера потужністю 3 кВт дуга виглядає дещо коротшою і відбувається певне порушення захисного газу. Це порушення викликано викидом пари, що виходить з парогозового каналу зварювальної ванни, і міститься як у додаванні пари металу, так і у змішуванні з киснем з навколишнього повітря. Хоча вплив цього порушення на властивості захисного газу є незначним, воно знижує зварювальний струм на 4...7 % під час гібридного зварювання порівняно з чистим GMAW.

В роботі [9] було встановлено, що зміна напруги на електричній дузі пов'язана із типом лазерного

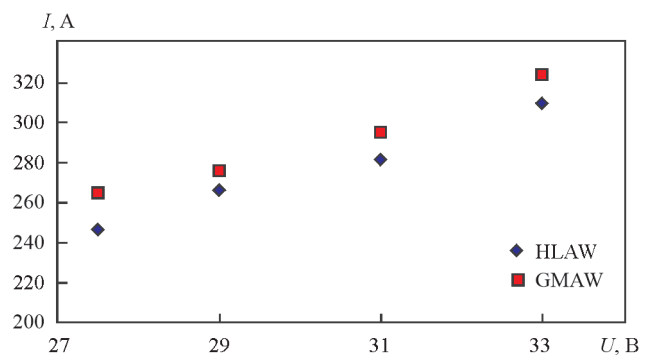


Рис. 1. Залежність зварювального струму від прикладеної напруги для подачі дроту Mn4Ni2CrMo (діаметром 1,2 мм) у випадках гібридного (HLAW) і дугового (GMAW) зварювання [8]

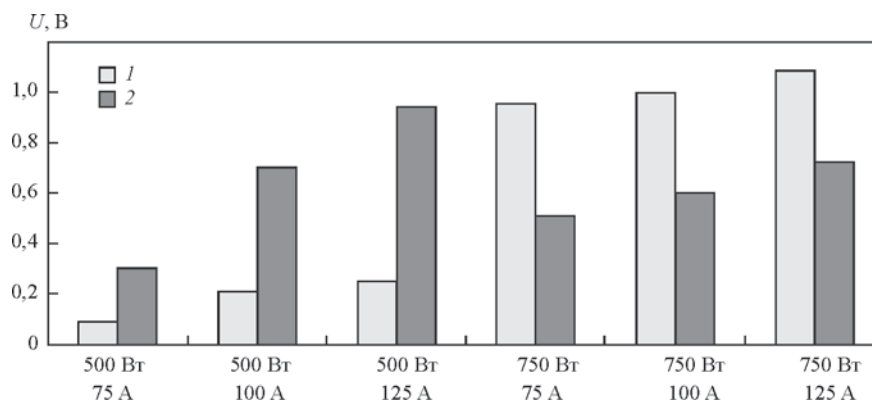


Рис. 2. Різниця напруги при постійній потужності лазера [9]: 1 – CO₂-лазер TIG-гібрид; 2 – Yb:YAG-лазер TIG-гібрид

випромінювання, яке використовується при гібридному зварюванні. Використання CO₂-лазера супроводжується більшим впливом на зміну напруги, який характеризується в її падінні (рис. 2). Також встановлено, що збільшення потужності лазера значно полегшує зміну напруги. При використанні випромінювання CO₂- та Nd:YAG-лазерів помічено практично однакове збільшення площі поперечного перерізу провару при гібридному зварюванні – щонайменше в 1,8 рази порівняно з сумою окремих площ лазерного і дугового (TIG) проварів (рис. 3). Крім того, стверджується, що лазерне випромінювання сприяє кращому формуванню швів (рис. 4).

В останні роки промислове розповсюдження отримали волоконні та дискові лазери. CO₂-лазери застосовують досить обмежено, переважно для різання (так звані щільні лазери) [10]. В процесах гібридного зварювання також превалюють волоконні та дискові лазери. В якості дугового джерела в таких процесах переважно використову-

ють MIG/GMAW, рідше TIG пальники. Проте, на думку авторів, використання плазмового джерела дозволить підвищити загальний ККД гібридного зварювання за рахунок стиснення дуги неплавкого електрода. Крім того, лазерно-плазмовий процес дозволить уникнути необхідності у виконанні розробки крайок, яке застосовують при гібридному зварюванні сталевих листів товщиною понад 5 мм [11]. Тому дослідницький інтерес становить процес, який поєднує зварювання випромінюванням волоконного лазера із плазмовим зварюванням.

Метою даної роботи є дослідження особливостей процесу лазерно-плазмового зварювання нержавіючої сталі товщиною до 10 мм з використанням випромінювання волоконного лазера в режимі глибокого проплавлення без розробки крайок.

Для досягнення цієї мети вирішувалися наступні задачі:

1) вибір режимів лазерного, плазмового і гібридного зварювання нержавіючої сталі за крите-

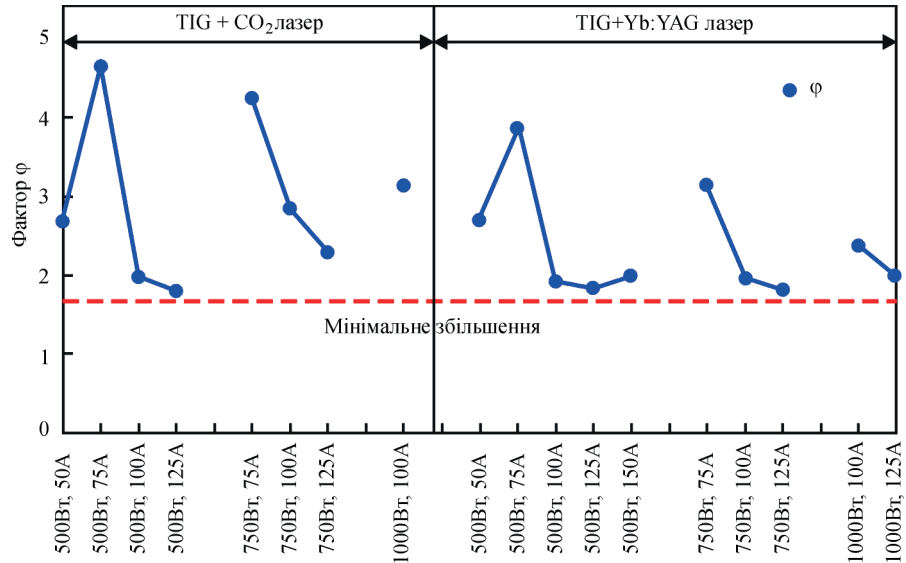


Рис. 3. Фактор $\phi = \frac{A_H}{A_T + A_L}$ як відношення площі поперечного перерізу гібридного провару A_H до суми окремих площ поперечних перерізів TIG (A_T) і лазерного (A_L) проварів [9]

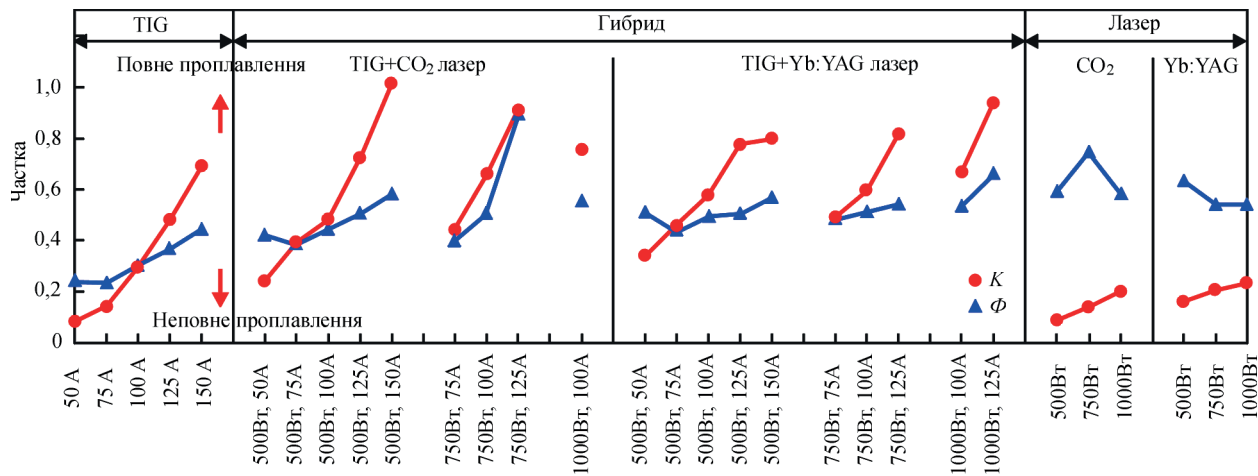


Рис. 4. Зміна параметрів геометрії зварного шва K і глибини проникнення Φ від параметрів зварювання ($K = D/W$, де D – глибина провару, W – ширина шва, $\Phi = D/T$, де D – глибина провару, T – товщина заготовки) [9]

рієм якості формування швів без розробки крайок;

2) порівняння площ поперечного перетину проварів, виконаних трьома досліджуваними способами, для визначення наявності синергетичного ефекту;

3) порівняння погонних енергій лазерного і гібридного процесів зварювання нержавіючої сталі;

4) оптимізація режиму гібридного зварювання по параметрах відношення площин проварів і геометрії швів;

5) визначення відмінності застосування випромінювання волоконного лазера від застосування діодного, Nd:YAG- та CO₂-лазерів.

В якості матеріалу зразків використовували пластини розміром від 100×50×δ мм до 300×100×δ мм з нержавіючої сталі AISI304 товщиною δ = 2, 4, 6 і 10 мм (табл. 1). Зварювання виконували у захисті аргону (витрати ~30 л/хв). В якості плазмоутворюючого газу також використовували аргон.

Для проведення експериментів було створено лабораторний стенд, постачений головками для лазерного, плазмового і гібридного зварювання (рис. 5). На першому етапі досліджень виконали дослідження з порівняння впливу на одержувану глибину провару бічного і коаксіального способів подачі захисного газу при зварюванні випромінюванням волоконного лазера. Ці дослідження показали порівняно близькі результати, що свідчить про низький рівень втрат випромінювання в плазмовому факелі, який утворюється над зварювальною ванною.

Крім того, на цьому ж етапі досліджень було встановлено основні технологічні параметри зварювання встик зразків зі сталі AISI304 лазерним і плазмовим способами. Експериментально встановили швидкості зварювання і потужності теплових джерел, при яких спостерігається якісне

формування зварних стикових з'єднань (табл. 2). Також було встановлено, що при лазерному зварюванні листів товщиною до 6 мм використання присаджувального дроту для покращення формування верхнього валика і кореня шва не є обов'язковим. Проте, зі збільшенням товщини зварюваних листів формування верхнього валика може погіршуватися за рахунок утворення підрізів.

На другому етапі досліджень проводили експерименти з гібридного зварювання в діапазоні швидкостей 0,25...4,0 м/хв при лазерній потужності до 2 кВт і струмі зварювання до 100 А. Було встановлено прямо пропорційний вплив потужності лазерного випромінювання на глибину проплавлення і плазмової потужності – на його ширину. Крім того, плазмова складова гібридного процесу сприяла покращенню формування верхнього валика швів і усувала небезпеку утворення підрізів при зварюванні листів товщиною 4...10 мм (рис. 6). Це дозволяє досягати якісного формування швів у всьому діапазоні досліджуваних товщин без застосування присаджувального дроту.

На третьому етапі досліджень визначали наявність синергетичного ефекту, зазвичай характерного для гібридного лазерно-плазмового зварювання. Для цього вимірювали і порівнювали площини поперечного перетину проварів, виконаних в пластині AISI304 (δ = 4 мм) трьома досліджуваними способами на швидкостях 2 і 4 м/хв (рис. 7). При цьому енергетика кожного з цих способів була незмінною і становила: потужність випромінювання $P = 1,6$ кВт, зварювальний струм $I = 80$ А при напрузі на дузі 24 В. Площу S_1 поперечного перерізу гібридного провару порівнювали із сумою площин S_2 і S_3 лазерного і плазмового проварів. У разі зварювання зі швидкістю 4 м/хв плазмовий процес практично не створював провару. Було встановлено,

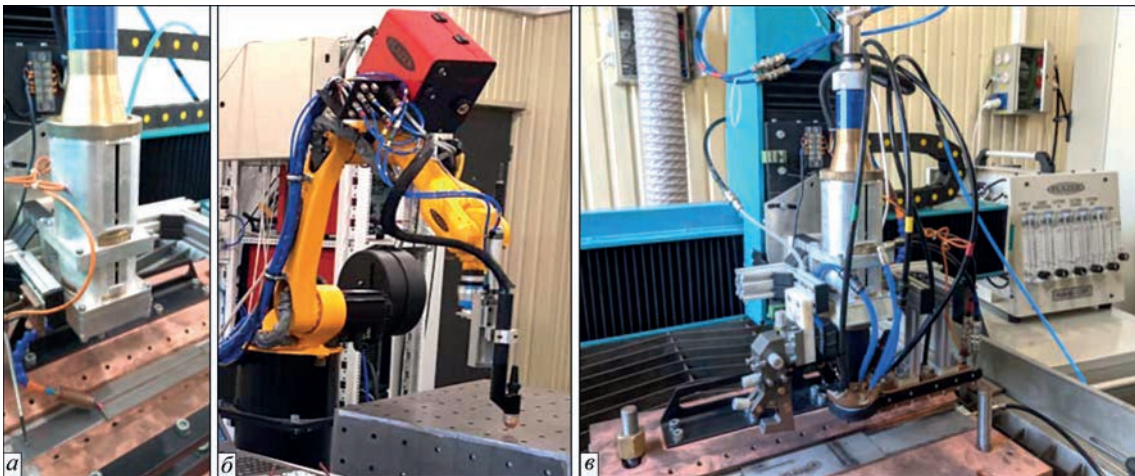


Рис. 5. Зовнішній вигляд лабораторних стендів для проведення технологічних досліджень зі зварювання: а – лазерного; б – плазмового; в – гібридного

Таблиця 1. Хімічний склад пластин зі сталі AISI304, які використовувалися в дослідженнях

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Cu	S	P
Основа	≤0,8	≤0,8	≤0,2	17,0...19,0	9,0...11,0	≤0,5	≤0,3	≤0,02	≤0,035

що при швидкості 2 м/хв площа $S1 = 3,121 \text{ мм}^2$ гібридного провару перевищує суму площин $S2 + S3 = 2,383 + 0,046 \text{ мм}^2$ майже на 30 %, а при швидкості

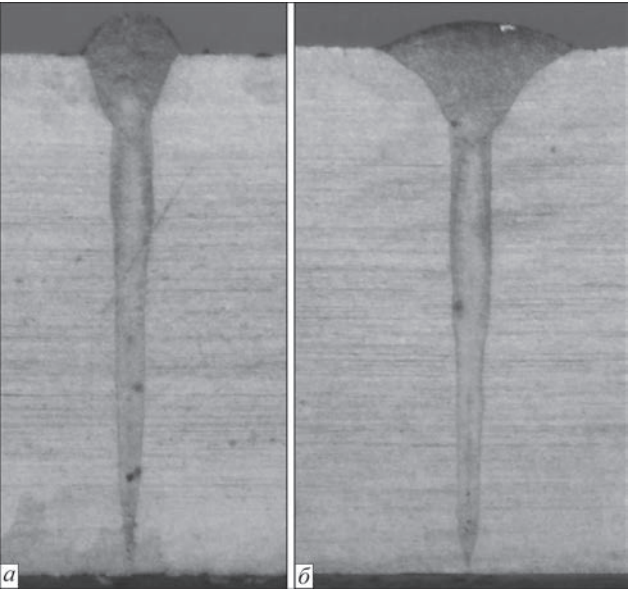


Рис. 6. Поперечні перетини проварів в пластині AISI304 ($\delta = 4 \text{ мм}$), виконані лазерним (а) і гібридним (б) способами зі швидкістю 4 м/хв

4 м/хв (гібрид $1,653 \text{ мм}^2$, лазер $1,32 \text{ мм}^2$, плазмове проплавлення відсутнє) – на $\sim 20 \%$. Це свідчить про безумовну наявність синергетичного ефекту при гібридному зварюванні.

Для порівняння ефективності досліджених лазерного, плазмового і гібридного зварювальних процесів використали значення їхніх погонних енергій E_{las} , E_{pl} і E_{Σ} , Дж/мм. Дані показники визначали як відношення потужності зварювального джерела до швидкості зварювання, помножене на ККД відповідного процесу. Значення ККД брали з рекомендацій літературних джерел. Так, ККД зварювання нержавіючої сталі за допомогою випромінювання волоконного лазера становить близько 75 % [12, 13]. Аналогічним можна обрати ККД плазмового зварювання [14]. Передбачувано, ККД лазерно-плазмового зварювання повинен становити близько 75 %. Це підтверджується дослідженнями авторів роботи [15]. Спираючись на виконані дослідження і наведені значення повного ККД вказаних процесів були одержані дані, внесені в табл. 2.

Виконані дослідження показали, що при зварюванні зразків товщиною 2 мм процес переважно є теплопровідним і не вимагає наявності присаджу-

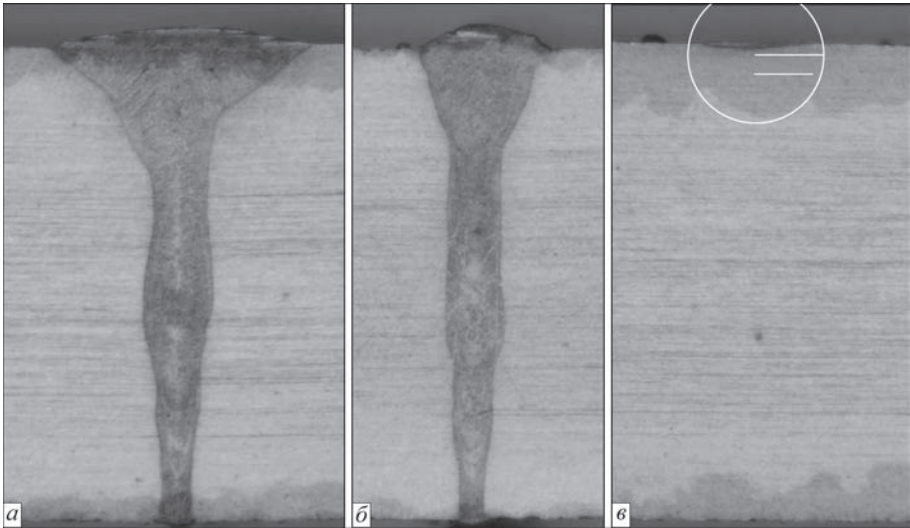


Рис. 7. Порівняння площин поперечного перерізу проварів, виконаних зі швидкістю 2 м/хв в пластині AISI304 ($\delta = 4 \text{ мм}$) гібридним (а), лазерним (б) і плазмовим (в) способами

Таблиця 2. Порівняння ефективності різних способів зварювання сталі AISI304 за критерієм погонної енергії (E , Дж/мм)

Номер п/п	Спосіб зварювання/кількість проходів	Товщина листа δ , мм	Потужність P ($P_{las} + P_{pl}$), кВт	Струм I , А	Напруга на дузі U , В	Швидкість зварювання V , м/хв	$E_{las} + E_{pl}$, Дж/мм	E_{Σ} , Дж/мм
1	Лазер/1	2	0,8	-	-	1,0	36	36
2	Плазма/1	2	2,2	80	28	0,3	336	336
3	Гібрид/1	2	0,8 + 2,2	80	28	1,5	24 + 68	92
4	Лазер/1	4	1,6	-	-	1,0	72	72
5	Гібрид/1	4	1,6 + 2,2	80	28	1,5	48 + 66	114
6	Гібрид/1	4	1,5 + 2,9	95	30	1,5	45 + 87	132
7	Гібрид/1	4	1,8 + 2,0	83	25	1,5	54 + 60	114
8	Лазер/1	6	1,8	-	-	0,8	104	104
9	Гібрид/1	6	1,8 + 2,0	80	25	1,2	71 + 82	153
10	Лазер/2	10	1,8	-	-	0,75	108·2	108·2
11	Гібрид/2	10	1,8 + 2,0	80	25	1,0	(81+90)·2	171·2

вальних матеріалів. При підвищенні товщини зразків до 4 мм і більше формування швів переходить в кинджальне. Для підвищення глибини проплавлення спробували зменшити швидкість зварювання. Проплавлення пластини AISI304 товщиною $\delta = 10$ мм із потужністю випромінювання 2,0 кВт дозволили досягти глибини порядку 7...8 мм при лазерному і 8 мм при гібридному процесі у разі швидкості 0,45 м/хв. В обох випадках подальше зниження швидкості зварювання з 0,45 до 0,25 м/хв не призвело до поглиблення провару. Тому, для одержання стикового з'єднання пластин товщиною $\delta = 10$ мм застосували двопрхідне зварювання, яке виконувалося з двох сторін із перекриттям коренів швів (рис. 8). Подальші випробування на статичний розрив отриманих зразків показали, що міцність одержаних гібридним зварюванням з'єднань знаходиться на рівні 95 % міцності основного металу.

На останньому, четвертому, етапі досліджень виконували порівняння погонних енергій лазерного і гібридного процесів зварювання нержавіючої сталі. Воно показало, що різниця між ними дещо зменшується із збільшенням товщини зварюваних зразків. Так, при зварюванні AISI304 товщиною $\delta = 2$ мм різниця погонної енергії гібридного процесу приблизно вдвічі перевищує енергію лазерного (табл. 2, режими № 1 і № 3), для $\delta = 4$ мм ця різниця складає приблизно 60 % (табл. 2, режими № 6 і № 7), а для $\delta = 6$ мм знаходиться на рівні 50 % (табл. 2, режими № 10 і № 11). Подальше збільшення глибини проплавлення (наприклад, до 8 мм) призводить до збільшення цієї різниці до 60 % (рис. 9). Частково це може бути пов'язано із переходом від теплопровідного процесу зварювання зразків товщиною $\delta = 2$ мм до кинджального процесу, характерного для більших товщин.

В цілому, дослідження лазерно-плазмового зварювання дозволяє заключити, що дія плазми переважно зводиться до наступного: підігрів поверхні зварюваного металу, переплавлення верхньої частини шва, покращення формування верхнього

валика. В свою чергу плазмовий підігрів поверхні зварюваного металу сприяє підвищенню коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання, що підвищує ефективний ККД зварювання [16]. Дія випромінювання волоконного лазера в гібридному лазерно-плазмовому процесі зводиться до забезпечення певної глибини проплавлення і формування кореневого валика. Дослідження показують, що як при лазерному, так і при лазерно-плазмовому зварюванні фіксована лазерна потужність дозволяє досягти фіксованої глибини проплавлення. При цьому зниження швидкості менше певного порогу не дозволяє збільшувати цю глибину. Для її підвищення необхідно підвищувати лазерну потужність. Формування кореневого валика зварного з'єднання при гібридному процесі дещо покращується порівняно із лазерним в першу чергу за рахунок збільшення погонної енергії.

Для випадків гібридного процесу з параметрами режиму $P = 1,8$ кВт, $I = 80$ А, $U = 25$ В при використанні волоконного лазера було побудовано графіки залежностей рекомендованих в роботі [9] параметрів геометрії шва від швидкості V зварювання (рис. 10). Характер цих залежностей дозволяє стверджувати, що доцільним є підвищення швидкості зварювання від 1,5 до 2,0 м/хв. Подальше підвищення швидкості дещо погіршує синергетичний ефект гібридного процесу. Проте, при продовженні підвищення швидкості до 4,0 м/хв спостерігається збільшення параметру геометрії зварного шва K , хоча й не таке інтенсивне, як до того, а зменшення фактору ϕ не є надто стрімким. Це дозволяє стверджувати, що в розглянутому випадку лазерно-плазмового зварювання діапазон швидкостей 1,5...2,0 м/хв є найбільш прийнятним.

Порівняння із вище наведених даних із одержаними раніш результатами лазерно-плазмового зварювання з використанням випромінювання діодного і CO_2 -лазера (наприклад, [17]) показує наступне. Випромінювання діодного лазера фо-

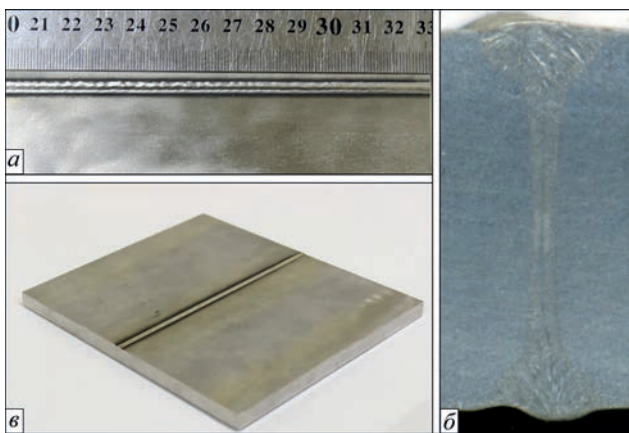


Рис. 8. Двопрхідне гібридне зварювання пластин AISI304 ($\delta = 10$ мм): а – зовнішній вигляд шва; б – поперечний перетин; в – зовнішній вигляд зварного з'єднання

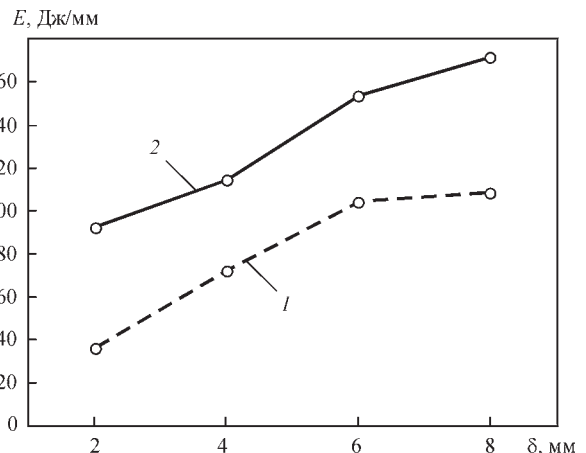


Рис. 9. Залежності погонної енергії E зварювання від товщини зразка δ зі сталі AISI304: 1 – лазерне зварювання; 2 – гібридне зварювання

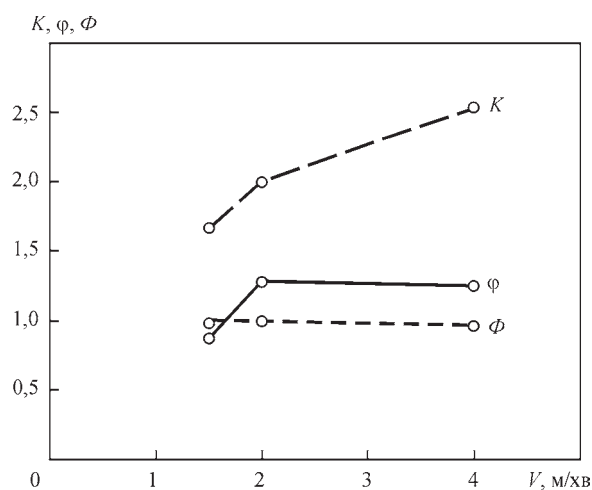


Рис. 10. Залежність фактору відношення площин ϕ , геометрії зварного шва K і глибини проникнення Φ від швидкості гібридного зварювання V сталі AISI304

кусувалося в пляму достатньо великого діаметра ($\sim 1,0$ мм), через що щільність його потужності становила до $2,5 \cdot 10^5$ Вт/см². Менший діаметр плями фокусування випромінювання волоконного лазера (порядку 0,05 мм) дозволяє отримувати більшу щільність потужності (до 10^8 Вт/см²) і значно поглибшати проплавлення порівняно з діодним. В усьому іншому вплив обох типів лазерного випромінювання на гібридний процес є подібним. Аналогічна ситуація спостерігалася у разі використання випромінювання Nd:YAG-лазера, яке фокусували у пляму 0,4 мм (щільність потужності до $3,5 \cdot 10^6$ Вт/см²). Зменшенню глибини проплавлення як при лазерному, так і при гібридному зварюванні випромінюванням Nd:YAG-лазера сприяє також менший коефіцієнт поглинання випромінювання (близько 50 % згідно роботі [18]).

У разі використання випромінювання CO₂-лазера наявний принципово інший механізм його впливу на гібридний процес. Значна доля такого випромінювання поглинається плазмовою складовою лазерно-плазмового процесу, перегріває її, спрямовує до місця впливу на зварювану деталь і забезпечує спільну дію двох теплових джерел. Через це синергетичний ефект лазерно-плазмового процесу при використанні випромінювання CO₂-лазера більш чітко виражений і збільшує площу поперечного перетину швів до 50 % порівняно із сумою площин швів, одержаних окремо лазерною і плазмовою складовими. Проте через менші значення густини потужності випромінювання (до 10^7 Вт/см²) і коефіцієнт його поглинання (на рівні 20...40 % згідно роботі [19]) глибина проплавлення є меншою, порівняно з використанням волоконного лазера як при лазерному, так і при гібридному зварюванні.

Дослідження показали, що у разі близьких показників енергії, яку підводять до зварюваного зразка (потужності випромінювання і плазми ~ 2 кВт кожна при швидкості процесу порядку

1,5 м/хв), використання випромінювання діодного лазера у гібридному процесі дозволяє зварювати листи нержавіючої сталі товщиною ~ 2 мм, використання Nd:YAG-лазера – до 3,5 мм, для CO₂-лазерів ~ 3 мм, а використання випромінювання волоконного лазера – понад 4 мм (орієнтовно 5 мм). У разі лазерного зварювання на тієї ж швидкості із потужністю 2 кВт глибини провару складуть: для випромінювання діодного лазера – до 1 мм, для Nd:YAG-лазера – до 3 мм, для CO₂-лазера – до 2 мм, а для волоконного лазера – понад 4 мм (орієнтовно 4,8 мм). Можна стверджувати, що використання випромінювання, діодного, Nd:YAG-, CO₂- і волоконного лазерів з урахуванням різниці в щільності потужності та коефіцієнтів поглинання при лазерно-плазмовому зварюванні збільшує глибини проварів, відповідно, на 100, 15, 33 та 4 % порівняно із лазерним зварюванням. При цьому ефективність використання волоконного лазера в гібридному процесі перевершує ефективність використання діодного лазера на 60 %, Nd:YAG-лазера – на 30 %, CO₂-лазера – на 40 %. Тому загальний результат застосування випромінювання волоконного лазера у лазерно-плазмовому зварюванні можна вважати найбільш ефективним з позицій глибини проплавлення і підвищення ефективного ККД процесу.

Висновки

1. Підтверджено наявність синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазера шляхом порівняння площі поперечного перерізу проварів, виконаних в пластині із нержавіючої сталі марки AISI304 ($\delta = 4$ мм) лазерним, плазмовим і гібридним (лазерно-плазмовим) способами. Визначено, що проявлення цього ефекту залежить від швидкості зварювання. При швидкості зварювання 2 м/хв з потужністю лазерного випромінювання і плазмової дуги по ~ 2 кВт площа перерізу гібридного провару (3,121 мм²) перевищує суми площі перерізів, отриманих лазерним (2,383 мм²) і плазмовим (0,046 мм²) способами, на 30 %, а для швидкості зварювання 4 м/хв вказане перевищення досягає ~ 20 %.

2. Встановлено, що лазерно-плазмове зварювання нержавіючої сталі з використанням випромінювання волоконного лазера відрізняється від аналогічних процесів з використанням випромінювання діодного, Nd:YAG-, CO₂-лазерів, а саме, – дозволяє збільшити глибину провару при одночасному зменшенні його ширини. Так, при використанні потужності лазера і плазми по ~ 2 кВт при швидкості $\sim 1,5$ м/хв глибина провару з використанням волоконного лазера в гібридному процесі збільшується порівняно з використанням діодного лазера на 60 %, Nd:YAG-лазера – на 30 %, CO₂-лазера – на 40 %.

3. Підвищення глибини провару при гібридно-му лазерно-плазмовому зварюванні у порівнянні із лазерним залежить від довжини хвилі випромінювання, щільності потужності та поглинальної здатності зварюваної поверхні. Так, при зварюванні нержавіючої сталі з використанням потужності лазера і плазми по ~ 2 кВт при швидкості $\sim 1,5$ м/хв вклад плазмового джерела енергії підвищує глибину провару при використанні діодного лазера на ~ 100 %, для Nd:YAG-лазера – на 15 %, для CO₂-лазера – на 33 %, а для волоконного лазера – на 4 % (порівняно із лазерним зварюванням тим же випромінюванням ~ 2 кВт при швидкості $\sim 1,5$ м/хв).

4. Порівняння погонних енергій лазерного (E_{las} , Дж/мм) і гібридного (E_{Σ} , Дж/мм) процесів зварювання нержавіючої сталі показало, що різниця між ними залежить від товщини зварюваних листів (або глибини провару). Спочатку показник $E_{\Sigma}/E_{\text{las}}$ зменшується від ~ 100 % для листів з $\delta = 2$ мм до 50 % для листів з $\delta = 6$ мм, а при подальшому збільшенні глибини провару від 6 до 8 мм цей показник підвищується від 50 до 60 %.

5. Аналіз поведінки фактору ϕ (відношення площі поперечного перерізу гібридного провару до суми площ поперечних перерізів плазмового і лазерного проварів), який характеризує синергетичний ефект, показує його зростання в діапазоні швидкостей зварювання сталі AISI304 1,5...2,0 м/хв з подальшим незначним зменшенням в діапазоні 2,0...4,0 м/хв. Параметр геометрії зварного шва K (відношення глибини провару до ширини шва) зростає у всьому проаналізованому діапазоні швидкостей (1,5...4,0 м/хв). Показник глибини проникнення Φ (відношення глибини провару до товщини заготовки) дещо зменшується в цьому діапазоні. Комплексний аналіз поведінки цих трьох параметрів дозволяє рекомендувати для лазерно-плазмового зварювання нержавіючої сталі з використанням випромінювання волоконного лазера діапазон швидкостей 1,5...2,0 м/хв як більш прийнятний за критеріями синергетичного ефекту і глибини проплавлення.

6. При гібридному зварюванні із використанням випромінювання волоконного лазера плазмова складова сприяє усуненню таких характерних для лазерного зварювання дефектів формування верхнього валику шва, як підрізи та гребінь, а також підвищує коефіцієнт поглинання випромінювання за рахунок підігріву поверхні зварюваної деталі. В діапазоні швидкостей 0,25...4,0 м/хв при потужності волоконного лазера від 0,8 до 2,0 кВт і струмі зварювання від 0 до 100 А має місце прямо пропорційне збільшення глибини проплавлення від 2 до 8 мм (залежно від лазерної потужності) і збільшення ширини верхнього валика підсилення від 1,5 до 5,5 мм (залежно від плазмової потужності).

Роботу виконано за підтримки:

– проекту Зони економічного і технологічного розвитку м. Гуанчжоу № 2019GH19 (Project of the Guangzhou Economic and Technological Development Zone 2019GH19), Китай;

– проекту «The National Key Research and Development Program of China (grant number 2020YFE02053000)», Китай;

– проекту Гуандунської академії наук № 2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting», Китай.

Список літератури/References

1. Khaskin, V.Yu., Korzhyk, V.M., Bernatskii, A.V. et al. (2020) Features of synergistic effect manifestation in laser-plasma welding of SUS304 steel, using disc laser radiation. *The Paton Welding J.*, 4, 29–33. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.04.04>
2. Thomy, C., Seefeld, T. (2006) Basics and applications of laser-GMA hybrid welding. *Ibid*, 6, 28–32.
3. Simões, L.M.C. (2010) Design, fabrication and economy of welded structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 40(1), 629–629. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0356-y>
4. Kah, P., Salminen, A., Martikainen, J. (2010) Laser-ARC hybrid welding processes (Review). *The Paton Welding J.*, 6, 32–40.
5. Hu, B., Ouden, G. den. (2005) Laser induced stabilisation of the welding arc. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10, 1, 76–81. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329305X29537>
6. Seyffarth, P., Krivtsun, I. (2002) *Laser-Arc Processes and Their Applications in Welding and Material Treatment*. London, Taylor and Francis Books, 1. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482264821>
7. (2018) *Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка». (2018) *Physical processes in welding and processing of materials. Theoretical study, mathematical modeling, computational experiment*. In: *Transact. of NANU*. Ed. by V.I. Krivtsun. Kiev, IAW [in Russian].
8. Eriksson, I., Powell, J., Kaplan, A. (2013) Guidelines in the choice of parameters for hybrid laser arc welding with fiber lasers. *Physics Procedia*, 41, 119–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.059>
9. Reisgen, U., Krivtsun, I., Gerhards, B., Zabirow, A. (2016) Experimental research of hybrid welding processes in combination of gas tungsten arc with CO₂- or Yb:YAG-laser beam. *Journal of Laser Applications*, 28, 022402. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4944096>
10. Wetzig, A., Herwig, P., Hauptmann, J. et al. (2016) Latest developments of laser cutting. *Journal of Laser Applications, ICALAO 2016*, 103. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5119063>
11. Jokinen, T., Vihervä, T., Riikonen, H. (2000) Welding of ship structural steel A36 using a Nd:YAG laser and gas-metal arc welding. *Journal of Laser Applications*, 12, 185–189. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.1309549>
12. Sokolov, M., Salminen, A. (2014) Improving Laser Beam Welding Efficiency. *Physics Procedia*, 6(09), 559–571. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2014.69057>
13. Sokolov, M., Salminen, A., Somonov, V., Kaplan, A.F.H. (2012) Laser welding of structural steels: Influence of the edge roughness level. *Optics & Laser Technology*, 44, 7, 2064–2071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.03.025>
14. DuPont, J.N., Marder, A.R. (1995) Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. *Welding J.*, 74, 12, 406–416.

15. Hipp, D., Mahrle, A., Beyer, E. et al. (2019) Thermal Efficiency Analysis for Laser-Assisted Plasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel. *Materials (Basel)*, 12(9):1460, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091460>
16. Khaskin, V.Yu., Korzhik, V.N., Chizhskaya, T.G. et al. (2016) Effect of laser radiation absorption on efficiency of laser welding of copper and its alloys. *The Paton Welding J.*, 11, 31–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.05>
17. Krivtsun, I.V., Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu. et al. (2007) Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys. *Ibid*, 5, 36–40.
18. Fuerschbach, P.W., Eisler, G.R. (2002) Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption. *Science and Technology of Welding and Joining*, 7, 241–246. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217102225004293>
19. Fuerschbach, P.W. (1996) Measurement and Prediction of Energy Transfer Efficiency in Laser Beam Welding. *Welding J.*, 75, 24–34. DOI: <https://doi.org/AC04-94AL85000>

FEATURES OF LASER-PLASMA WELDING OF CORROSION-RESISTANT STEEL AISI 304 USING LASER

V.M. Korzhyk^{1,2}, V.Yu. Khaskin^{1,2}, A.A. Grynyuk², E.V. Ilyashenko², A.V. Bernastkyi², S.I. Peleshenko³

¹China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding of the Guangdong Academy of Sciences. Guangdong Key Laboratory of Advanced Welding Technologies, Guangzhou, China

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

³NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» 37 Peremohy Ave., Kyiv

The paper confirms the presence of synergic effect at laser-plasma welding, using fiber laser, by comparing the cross-sectional areas of beads deposited in AISI 304 plate ($\delta = 4$ mm) by laser, plasma, and hybrid processes at close power values of laser radiation and plasma arc (~ 2 kW each). It is determined that the manifestation of this effect depends on welding speed. At the speed of 2 m/min the hybrid bead cross-sectional area can exceed the sum of areas produced with the laser and plasma processes by up to 30%, and for the speed of 4 m/min by ~ 20 %. Comparison of input energy of the laser and hybrid processes of stainless steel welding showed that the difference between them depends on the welded sheet thickness (or penetration depth). This value first decreases from ~ 100 % for sheets with $\delta = 2$ mm to 50 % for sheets with $\delta = 6$ mm, and at further increase of penetration depth it rises to 60 %. The nature of dependencies of the factor of area ratio ϕ , weld geometry K and penetration depth Φ on the speed of hybrid welding of AISI 304 steel allows recommending the range of speeds of 1.5...2.0 m/min, as a more acceptable by the criteria of synergic effect and penetration depth. It is found that at hybrid welding with application of fiber laser radiation, the plasma component promotes elimination of such defects of weld upper bead formation, characteristic for laser welding, as undercuts and a ridge, etc. 19 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

Keywords: hybrid laser-plasma welding, fiber laser, stainless steel, synergic effect, penetration depth, energy input

Надійшла до редакції 18.10.2021



**CUTTING
WORLD®**

Cutting World

спеціалізований торговий ярмарок
Messe Essen, 25-27 квітня 2023

Після того, як цього року довелося зробити перерву через пандемію, галузь металообробки з нетерпінням чекає фахівців до майбутнього синергетичного поєднання торгової ярмарки та конгресу.

Відомі компанії підтвердили участь у Cutting World 2023. Зараз відкрита реєстрація зі знижкою для раннього бронювання Cutting World. Серед інших, свою участь вже підтвердили Air Liquide, Beosys, Boschert, Expercut, IHT Automation, Mecanumeric, NUM, Mazak, Messer Cutting Systems, STM Waterjet і WBM. Усі вони переконані концепцією Cutting World. Як єдиний вузькоспеціалізований торговий ярмарок у своєму секторі, він об'єднує попит і пропозицію на все, що стосується професійного різання. Тут показані рішення по всьому ланцюжку процесу. Виробники систем кисневого різання, систем плазмового різання, систем лазерного різання та систем гідроабразивного різання – усі вони представляють себе на виставці. На додаток до технологій різання, асортимент включає процеси на початку і після: від підготовки робіт, програмне забезпечення для керування та системи фільтрації, видалення задирок і кромки, а також маркування розрізаних матеріалів. Таким чином, виставка орієнтована насамперед для відвідувачів із секторів листообробної промисловості, а також переробників неметалевих матеріалів. Cutting World представить себе всім їм як барометр трендів. Зрештою, у 2023 р. в центрі уваги буде цифрова мережа виробничих процесів. Особливу додаткову цінність виставці надасть Німецький розкрійний конгрес, який проводитиметься паралельно. Там відомі спікери нададуть інформацію про актуальні теми та інновації, які рухають індустрію.

www.messe-essen.de

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЗА РОЗМІРАМИ В МЕТАЛІ ЗВАРНИХ ШВІВ

Л.А. Тараборкін, В.В. Головка

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

Існує велика кількість досліджень впливу розподілу неметалевих включень в металі зварного шва на його структуру і механічні властивості. Однак, автори цих робіт не дають опису кінетики формування такого розподілу. В роботі наведено результати розробки моделі розподілу в металі зварних швів неметалевих включень за розмірами. Формування розрахункової частини моделі побудовано на базі обробки експериментальних даних щодо розмірів неметалевих включень у металі зварних швів, наплавлених методами зварювання під флюсом і в середовищі захисного газу. Узагальнення і аналіз експериментальних даних показали, що кінцевий розподіл включень за розмірами в металі досліджених швів підкорюється закону гамма-розподілу (ймовірність > 95 %). Авторами запропоновано для опису еволюції розподілу неметалевих включень під час утворення зварного шва застосувати ймовірнісну модель у вигляді гамма-розподілу із залежними від часу параметрами. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: низьколегована сталь, зварювання, метал шва, неметалеві включення, розподіл

Неметалеві включення є невід’ємною складовою структури металу зварних швів. Такі їх характеристики як хімічний склад, розміри, щільність розподілу в твердому розчині справляють суттєвий вплив на механічні властивості металу швів, що визначає актуальність можливості їх прогнозування. У зв’язку з постійно зростаючим обсягом використання низьколегованих високоміцних сталей при виготовленні металоконструкцій багато уваги в останні роки приділяється дослідженню можливостей забезпечення механічних властивостей зварних з’єднань на сталях цього типу на рівні основного металу. Було показано суттєвий вплив на умови формування мікроструктури і механічних властивостей металу швів з боку неметалевих включень [1–4], які впливають на процеси кристалізації, утворення первинної та вторинної мікроструктури, але при цьому паралельно відбувається зміна параметрів їх розміру, щільності розподілу, складу і поверхневих сполук. У металі зварного шва зафіксовано кінцевий результат процесів формування неметалевих включень (розкислення рідкого металу, кристалізація зварювальної ванни, дифузія в твердому розчині), які відбуваються в різних температурних діапазонах. Інтенсивність розвитку кожного з етапів цих процесів впливає на кінцевий розподіл неметалевих включень. Так, наприклад, в роботі [5] показано, що час існування рідкої фази при охолодженні металу справляє суттєвий вплив на розміри включень, тому для прогнозування характеристик включень необхідно враховувати не тільки хімічний склад зварювальної ванни, але і час її існування. Слід зауважити, що незважаючи на велику кількість робіт, в яких відзначено вплив скла-

ду, морфології та розмірів неметалевих включень на структуру і механічні властивості металу швів, питанню впливу щільності розподілу включень залежно від їх розміру приділено недостатньо уваги.

Стан проблеми. Розподіл неметалевих включень у металах за розмірами чисельно характеризують за допомогою функції щільності розподілу, яку в загальному випадку визначають, розв’язуючи рівняння Смолуховського [6]. Однак, оскільки процеси укрупнення неметалевих включень є доволі складними в будь-якій металургійній системі, то для такого розв’язання доводиться вводити додаткові припущення щодо умов і характеристик відповідного процесу, які не завжди споряджені необхідними чисельними значеннями параметрів або взагалі не піддаються перевірці. Наприклад, у згаданій роботі [6] список зазначених припущень налічує 19 пунктів. Тому використовують інший, розрахунково-експериментальний підхід, а саме: базуючись на великому масиві накопичених експериментальних даних, намагаються наблизити експериментально спостережені розподіли неметалевих включень за розмірами певними відомими математичними функціями розподілів.

Зокрема, у роботах [7, 8] зазначено, що розподіл неметалевих включень за розмірами для деяких нестационарних металургійних процесів можна вважати постійним експоненціальним розподілом і описати формулою

$$n(r) = n_0 \exp(-r), \quad r_0 < r < r_{\max}, \quad (1)$$

де параметри n_0 , λ залежать від конкретних умов і обладнання, а включення мають форму сфери з поточним радіусом r .

Головка В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>

© Л.А. Тараборкін, В.В. Головка, 2021

Формула (1) придатна у випадку таких металургійних процесів виробництва сталі як циркуляційне вакуумування, вакуумне рафінування, безперервне розливання, ковшова обробка. Для цих процесів значення λ знаходяться в діапазоні від 0,44 до 0,75 для радіусів неметалевих включень від 1 до 30 мкм [7].

Відомо, що як самі розміри неметалевих включень, так і щільність їх розподілу за розмірами залежать від тривалості процесів формування включень [8–10].

Процес формування неметалевих включень у зварювальній ванні суттєво відрізняється як за своїми термодинамічними, та і фізико-хімічними характеристиками від відповідних процесів «великої» металургії. Можна відзначити певні спроби щодо чисельного оцінювання тенденцій у зміні щільності неметалевих включень залежно від їхніх розмірів [11], проте загалом на сьогодні в науково-технічній літературі відсутні описи моделей для розрахунку розподілу включень у металі зварних швів за розміром, які б дозволяли виконувати відповідні чисельні прогнози, хоча актуальність можливості таких прогнозів безсумнівна.

Методика роботи. Цифрові знімки поверхні нетравлених шліфів були отримані на оптичному мікроскопі NEOPHOT–30 за допомогою цифрової фотокамери високої розподільчої здатності. Далі знімки оброблялися з метою збільшення точності подальшого розпізнавання неметалевих включень за допомогою спеціального програмного забезпечення (був застосований фільтр Гаусса [12]). Розмір кожного знімка складає 2592 на 1944 пікселів. Оброблені знімки піддавалися розпізнаванню за допомогою спеціального програмного забезпечення (пробна версія Media Cybernetics ImagePro, доступна на сайті виробника <http://www.mediacy.com/>). За цією методикою визначали об'ємний вміст ($V_{\text{нв}}$) та розподіл за розмірами неметалевих включень в металі швів.

Розгляд характеру розподілу неметалевих включень було розпочато з моделі (1), знайденої для процесів виробництва сталей. Значення параметра n_0 для умов існування зварювальної ванни можна визначити, виходячи з закону збереження речовини на основі таких міркувань:

Кількість кисню у включенні радіуса r і густини ρ_{inc} дорівнює $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{inc}} X_o$, де X_o – масова частка кисню у включенні. Тоді, відповідно до виразу (1), кількість кисню у включеннях радіуса r дорівнюватиме

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{inc}} X_o n(r) = \frac{4}{3}\pi \rho_{\text{inc}} X_o n_0 e^{-\lambda r} r^3.$$

Отже, загальна кількість кисню, що міститься у включеннях радіусом від r_{min} до r_{max} визначається інтегралом

$$\frac{4}{3}\pi \rho_{\text{inc}} X_o n_0 \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 e^{-\lambda r} dr. \quad (2)$$

З іншого боку, позначивши через ρ_s густину розплавленої сталі, а через w_o – вміст кисню у включеннях на одиницю маси розплавленого металу, зазначену кількість кисню у включеннях можна оцінити добутком $\rho_s w_o$, який, за законом збереження речовини, маємо прирівняти до виразу (2):

$$\frac{4}{3}\pi \rho_{\text{inc}} X_o n_0 \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 e^{-\lambda r} dr = \rho_s w_o.$$

Із останньої рівності отримуємо вираз для параметра n_0 :

$$n_0 = \frac{3\rho_s w_o}{4\pi \rho_{\text{inc}} X_o \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 e^{-\lambda r} dr}. \quad (3)$$

Щоб спростити роботу з виразом (3), наслідуючи роботу [12], можна замінити в ньому w_o на [О%], тобто загальну кількість кисню в розплавленому металі. Така заміна означає, що подальші результати щодо кількості включень фактично даватимуть верхню межу чисельної оцінки.

Крім цього, інтеграл у знаменнику дробу з виразу (3) можна підраховувати точно, оскільки за [13]

$$\int x^3 e^{ax} dx = e^{ax} \left(\frac{x^3}{a} - \frac{3x^2}{a^2} + \frac{6x}{a^3} - \frac{6}{a^4} \right),$$

звідки випливає, що

$$\begin{aligned} \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 e^{-\lambda r} dr &= \frac{1}{\lambda} \left[\exp(-\lambda r_{\text{max}}) r_{\text{max}}^3 - \exp(-\lambda r_{\text{min}}) r_{\text{min}}^3 \right] - \\ &- \frac{3}{\lambda^2} \left[\exp(-\lambda r_{\text{max}}) r_{\text{max}}^2 - \exp(-\lambda r_{\text{min}}) r_{\text{min}}^2 \right] + \\ &+ \frac{6}{\lambda^3} \left[\exp(-\lambda r_{\text{max}}) r_{\text{max}} - \exp(-\lambda r_{\text{min}}) r_{\text{min}} \right] - \\ &- \frac{6}{\lambda^4} \left[\exp(-\lambda r_{\text{max}}) - \exp(-\lambda r_{\text{min}}) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Зважаючи на те, що значення найменшого та найбільшого радіусів включень відрізняються щонайменше на порядок, для отримання простої наближеної чисельної оцінки можна додатково замінити у виразі (3) скінченний інтеграл на нескінченний на інтервалі (від 0 до ∞), тоді, відповідно до [13]:

$$\int_0^{\infty} r^3 e^{-\lambda r} dr = \frac{6}{\lambda^4}$$

і, отже,

$$n_0 = \frac{1}{8\pi} \frac{\rho_s}{\rho_{inc} X_o} [O\%] \lambda^4. \tag{5}$$

Відносна похибка обчислення за формулою (5) становить менше 2,4 % порівняно з обчисленням за точною квадратурою (4).

Отримані результати. З метою перевірки придатності моделювання розподілу за формулою (1) були виконані експериментальні дослідження, в яких визначали характеристики неметалевих включень у металі швів, які відрізнялися як часом існування рідкого металу зварювальної ванни в залежності від погонної енергії процесу, так і його хімічним складом. Дослідженню підлягали зразки наплавленого металу, які були отримані при зварюванні під флюсом стикових з’єднань низьколегованої сталі 10ХСНД товщиною 14 мм з погонною енергією 36 кДж/см (шви НН-1, НН-2, НН-3), а також в середовищі захисного газу з погонною енергією 21 кДж/см (шви НН-4, НН-5). Параметри режиму зварювання відповідали вимогам стандартів ISO 14171 (зварювання під флюсом) і ISO 26304 (зварювання в середовищі захисного газу). Хімічний склад металу швів і вміст у них неметалевих включень ($V_{нмв}$) наведено в табл. 1. Інші особливості методики експериментальних досліджень викладено в роботі [13].

Проведене нами експериментальне дослідження розподілу неметалевих включень у ме-

талі зварних швів, виконаних методами зварювання під флюсом і порошковим дротом (рис. 1) показало, що експериментальні розподіли не є експоненціальними з надійною ймовірністю щонайменше 95 % за критеріями Пірсона та Колмогорова-Смірнова.

Аналітичний аналіз показав, що наявні експериментальні дані можливо описати функцією гамма-розподілу з заданою надійною ймовірністю.

Для аналізу розподілу неметалевих включень використовували функцію щільності ймовірності гамма-розподілу, яка має вигляд [13]

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right)}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}, \tag{6}$$

$$\alpha, \beta > 0; \quad 0 < x < \infty,$$

де $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функція; параметри α і β називають параметрами форми та масштабу відповідно.

Цей розподіл характерний тим, що багато які інші розподіли є його частинними випадками. Зокрема, як видно з формул (6) та (1), за умови, що параметр форми $\alpha = 1$, гамма-розподіл перетворюється в експоненціальний розподіл, причому в разі збільшення значення параметра форми поведінка розподілу якісно змінюється (рис. 2).

Аналіз поведінки функцій щільності ймовірності експоненціального та гамма-розподілу, а також

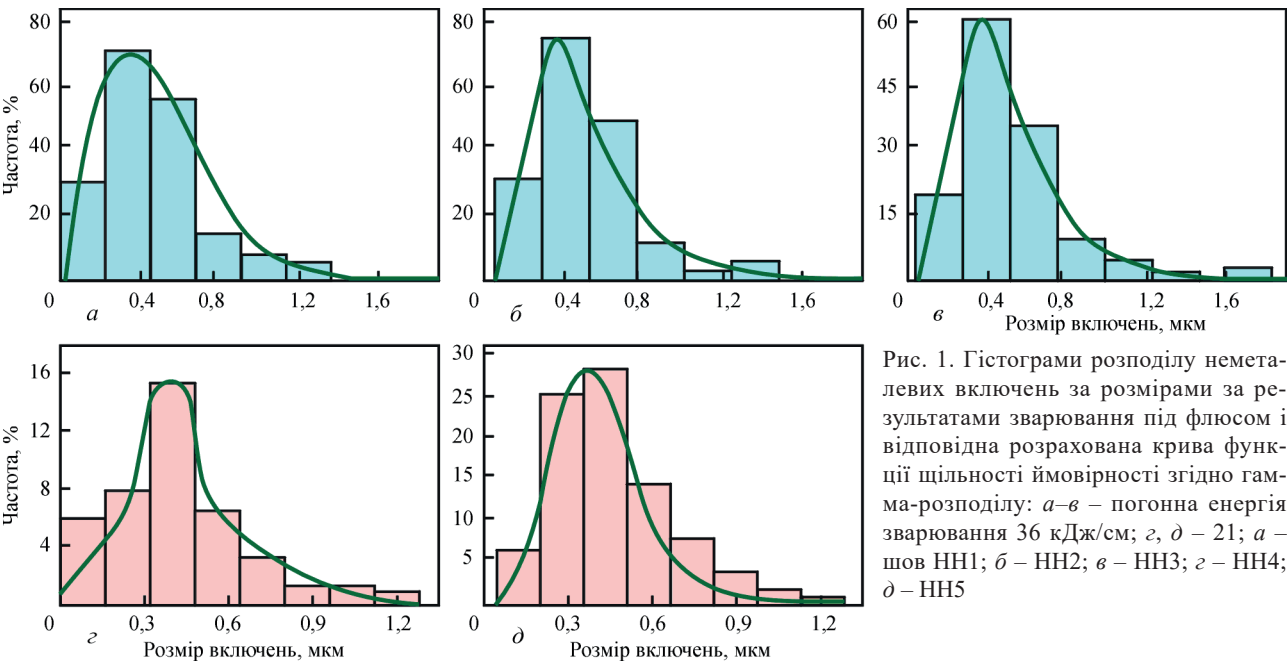


Рис. 1. Гістограми розподілу неметалевих включень за розмірами за результатами зварювання під флюсом і відповідна розрахована крива функції щільності ймовірності згідно гамма-розподілу: а–в – погонна енергія зварювання 36 кДж/см; з, д – 21; а – шов НН1; б – НН2; в – НН3; з – НН4; д – НН5

Таблиця 1. Хімічний склад та вміст неметалевих включень в металі швів

Номер шва	Масова частка (%) в металі шва												$V_{нмв}, \%$
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	O	
НН1	0,034	0,212	1,51	0,023	0,021	0,41	3,74	0,44	0,12	0,022	0,009	0,078	0,62
НН2	0,038	0,417	1,57	0,025	0,022	0,33	3,50	0,52	0,13	0,034	0,044	0,070	0,58
НН3	0,034	0,321	1,38	0,023	0,015	0,39	3,83	0,51	0,12	0,020	0,005	0,067	0,55
НН4	0,050	0,290	1,32	0,024	0,014	0,16	2,19	0,27	0,36	0,039	0,019	0,061	0,47
НН5	0,049	0,298	1,39	0,023	0,015	0,15	2,26	0,25	0,44	0,039	0,008	0,072	0,58

Таблиця 2. Експериментальні значення параметрів форми та масштабу для зварювання під флюсом

Код виміру	НН1-1	НН1-2	НН1-3	НН1-4	НН1-5
Параметр форми	3,52979	2,90481	3,00837	2,81644	2,66076
Параметр масштабу, 10 ⁻⁶ м	7,40262	6,53177	6,51605	5,73114	4,94883
Код виміру	НН2-1	НН2-2	НН2-3	НН2-4	НН2-5
Параметр форми	2,99376	3,25676	3,19255	3,41001	2,68183
Параметр масштабу, 10 ⁻⁶ м	5,39726	5,99253	6,24691	6,57369	4,99286
Код виміру	НН3-1	НН3-2	НН3-3	НН3-4	НН3-5
Параметр форми	2,65562	3,30154	3,63677	3,4343	3,17487
Параметр масштабу, 10 ⁻⁶ м	5,12298	6,35464	6,36239	6,75384	5,51374
Код виміру	НН4-1	НН4-2	НН4-3	НН4-4	НН4-5
Параметр форми	3,94454	2,88799	2,74705	3,44743	2,33062
Параметр масштабу, 10 ⁻⁶ м	8,89796	5,50171	6,3869	7,40532	4,2632
Код виміру	НН5-1	НН5-2	НН5-3	НН5-4	НН5-5
Параметр форми	2,60281	4,14994	3,6945	3,54269	3,40696
Параметр масштабу, 10 ⁻⁶ м	548739,	8,26347	7,54531	7,70252	7,81811

Примітка. параметр форми та масштабу розраховували за формулами (7) і (13), відповідно.

фізичної картини укрупнення неметалевих включень за рахунок коагуляції приводить до поданого далі модельного опису розподілу неметалевих включень у металі зварного шва.

На початку процесу укрупнення неметалевих включень їх розподіл за розмірами підкоряється експоненціальному закону, оскільки переважна їх частка має маленькі радіуси, близькі до критичного.

У процесі укрупнення за рахунок коагуляції відносна кількість включень малих радіусів зменшується, а великих – збільшується, що призводить до зміни форми функції розподілу з монотонно спадаючої, що відповідає експоненціальному розподілу за розмірами, на одномодальну (з максимумом), що відповідає гамма-розподілу.

Таким чином, на момент початку процесу (змінна часу $t = 0$) параметр форми $\alpha = 1$, а в кінці процесу, відповідно до наших експериментально-розрахункових даних, набуває значення з діапазону 2,33...4,15 (табл. 2).

Позначаючи кінцеве значення параметра форми через a_k і вважаючи параметр форми лінійною функцією від часу $a(t)$, отримуємо таку залежність параметра форми від часу:

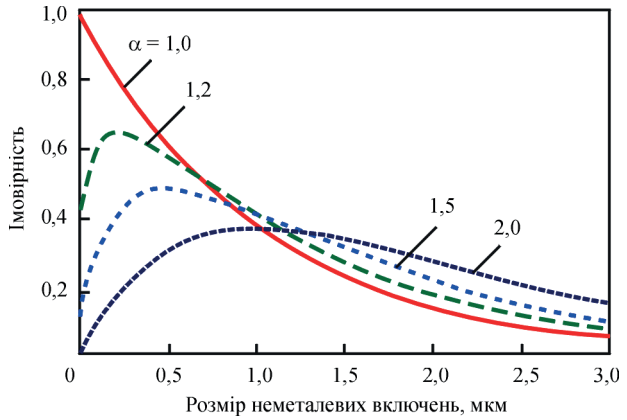


Рис. 2. Змінення поведінки функції щільності ймовірності гамма-розподілу залежно від значення параметра форми α

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_k - 1}{t_k} t + 1, \tag{7}$$

де t_k – кінцеве значення часу.

Отже, для подальших оціночних розрахунків для аналізу розподілу неметалевих включень за розміром при зварюванні під флюсом можна задати значення $a_k = 3$, що приблизно є середньою точкою інтервалу змінення параметра форми в цьому випадку.

Тривалість процесу за заданих умов зварювання прийемо $t_k = 3,5$ с, що впливає з результатів моделювання росту неметалевих включень в металі зварної ванни.

Тоді з рівняння (7) впливає таке рівняння для опису залежності параметра форми від часу:

$$\alpha(t) = \frac{4}{7} t + 1. \tag{8}$$

Оскільки ядром утворених неметалевих включень є зародки тугоплавких оксидів хімічного складу Al_2O_3 , користуємось надалі значеннями: густина сталі $\rho_s = 7,15 \cdot 10^3$ кг/м³; густина неметалевого включення (дорівнює густині глинозему) $\rho_{ins} = 3,97 \cdot 10^3$ кг/м³; $X_0 = 47,1$ % загальна кількість кисню в розплавленому металі $[O\%] = 0,055$.

Тоді вираз (5) набуває вигляду

$$n_0 = \frac{1}{8 \cdot 3,1415926} \cdot \frac{7,15 \cdot 10^3 \cdot 0,02}{3,97 \cdot 10^3 \cdot 47,1} \lambda^4 = 0,83677 \cdot 10^{-4} \lambda^4. \tag{9}$$

Очевидно, що величина, обернена до λ у виразі (1), є в точності параметром масштабу, так що $\beta = 1/\lambda$ у введених позначеннях і рівняння (1) перепишемо у вигляді

$$n(r) = n_0 \exp\left(-\frac{r}{\beta}\right) = n_0 \beta \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{r}{\beta}\right) = n_0 \beta f(x; 1, \beta), \tag{10}$$

звідки впливає для заданих значень параметрів:

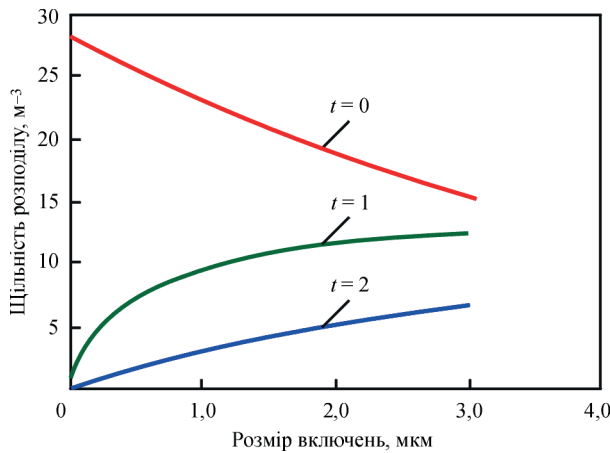


Рис. 3. Змінення розподілу неметалевих включень у часі t за умови відсутності утворення нових зародків включень під час процесу

$$n(r) = 0,30428 \cdot 10^{-4} \lambda^3 f(x; 1, \lambda^{-1}) = 0,83677 \cdot 10^{-4} \beta^3 f(x; 1, \beta). \quad (11)$$

Залежність (11) описує початковий розподіл неметалевих включень за розміром при зварюванні під флюсом. Залежність від часу шуканого розподілу природно подати у вигляді:

$$n(r, t) = 0,83677 \cdot 10^{-4} \beta^3 f(x; \alpha(t), \beta(t)), \quad (12)$$

де параметр масштабу також вважатимемо лінійною функцією від часу з кінцевими значеннями, що відповідають значенням параметра форми з табл. 1:

$$\beta(t) = \beta_0 + \frac{\beta_k - \beta_0}{t_k} t. \quad (13)$$

Одержані формули дозволяють скористатись інструментом електронних таблиць для розрахунку розподілу неметалевих включень за розмірами в дискретному об'ємі металу залежно від часу (рис. 3). Відображені на графіку результати відповідають даним роботи [11].

Розглядаючи реальний процес, необхідно, як зазначено в роботі [9], враховувати утворення зародків неметалевих включень за певної температури залежно від швидкості їхнього утворення та часу перебування в заданому температурному діапазоні. Таким чином, оцінку щільності розподілу неметалевих включень отримуємо як суму добутків зазначених швидкостей на відповідні значення змінної часу.

Підсумковий результат подано на рис. 3. Видно, що гамма-розподіл дозволяє об'єктивно описувати функцію щільності ймовірності розподілу неметалевих включень за розмірами незалежно від часу перебування рідкого металу в зварювальній ванні і хімічного складу розплавленого металу.

Висновки

1. Встановлено, що обробка експериментальних даних щодо розмірів неметалевих включень

у металі зварних швів, наплавлених методами зварювання під флюсом і в середовищі захисного газу, показала, що кінцевий розподіл за розмірами досліджених включень підкоряється закону гамма-розподілу (ймовірність > 95 %).

2. Показано, що для опису еволюції розподілу неметалевих включень під час утворення зварного шва доцільно застосовувати ймовірнісну модель у вигляді гамма-розподілу із залежними від часу параметрами.

3. На початку процесу розподіл неметалевих включень у запропонованій моделі є експоненціальним, у зв'язку з тим, що значення параметра форми дорівнює одиниці. Значення параметрів форми й масштабу, обчислені за експериментальними даними, становлять 2,6...3,9 та 4200...8900, відповідно, незалежно від виду зварювання.

Список літератури/References

- Oh, Y.J., Lee, S.Y., Byun, J.S. et al. (2000) Non-metallic inclusions and acicular ferrite in low carbon steel. *Materials Transactions, JIM*, 41, 12, 1663–1669.
- Quintana, M.A., McLane, J., Babu, S.S., David, S.A. (2001) Inclusion Formation in Self-Shielded Flux Cored Arc Welds. *Welding J.*, 4, 98–105.
- Babu, S.S. (2004) The mechanism of acicular ferrite in weld deposits. *Current opinion in solid state and materials science*, 8, 267–278.
- Lee, T.K., Kim, H.J., Kang, B.Y., Hwang, S.K. (2000) Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds. *ISIJ International*, 40, 12, 1260–1268.
- Zhang, J., Lee, H.G. (2004) Numerical modeling of nucleation and growth of inclusions in molten steel based on mean processing parameters. *Ibid*, 44, 10, 1629–1638.
- Kwon, Y.-J., Zhang, J., Lee, H.-G. (2008) A CFD-based Nucleation-growth-removal Model for Inclusion Behavior in a Gas-agitated Ladle during Molten Steel Deoxidation. *Ibid*, 48, 7, 891–900.
- Njzawa, H., Kato, Y., Sorimachi, K., Nakanishi, T. (1999) Agglomeration and Flotation of Alumina Clusters in Molten Steel. *Ibid*, 39, 5, 426–434.
- Zinngrebe, E., Van Hoek, C., Visser, H. et al. (2012) Inclusion Population Evolution in Ti-alloyed Al-killed Steel during Secondary Steelmaking Process. *Ibid*, 52, 1, 52–61.
- Hong, T., Debroy, T., Babu, S.S., David, S.A. (2000) Modeling of Inclusion Growth and Dissolution in the Weld Pool. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 20B, 2, 161–169.
- Zhang, L., Thomas, B.G. (2003) Inclusion nucleation, growth, and mixing during steel deoxidation. *UIUC, Continuous Casting Report № 200206*, 1–19.
- Zhang, B.W., Li, B.W. (2007) Growth Kinetics of Single Inclusion Particle in Molten Melts. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 20, 2, 129–138.
- Lucas J. van Vliet, Ian T. Young, Piet, W. (1998) Verbeek Recursive Gaussian Derivative Filters Fac. of Appl. Phys., Delft Univ. of Technol. DOI: 10.1109/ICPR.1998.711192 Conference: Pattern Recognition. *Proceedings. Fourteenth International Conference on*, Vol. 1.
- Градштейн И.С., Рыжик И.М. (1971) *Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений*. Москва, Наука.
- Gradshteyn, I.S., Ryzhik, I.M. (1971) *Tables of integrals, sums, series and products*. Moscow, Nauka [in Russian].
- Головкин В.В., Походня И.К. (2013) Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла швов высокопрочных низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*, 6, 3–11.
- Golovko, V.V., Pokhodnya, I.K. (2013) Effect of non-metallic inclusions on formation of structure of the weld metal in high-strength low-alloy steels. *The Paton Welding J.*, 6, 2–10.

CALCULATED-EXPERIMENTAL MODEL OF DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN THE METAL OF WELDS BY SIZES

L.A. Taraborkin, V.V. Golovko

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

There is a large number of investigations on the impact of distribution of non-metallic inclusions in the weld metal on its structure and mechanical properties. However, the authors of these works do not describe the kinetics of forming such a distribution. The results of the development of a distribution model in the weld metal of non-metallic inclusions by sizes are presented. Formation of the calculation part of the model is based on the processing of experimental data on the sizes of non-metallic inclusions in the metal of welds, deposited by the methods of submerged welding in the medium of shielding gas. Generalization and analysis of experimental data showed that the final distribution of inclusions in the metal of the studied welds is submitted to the law of gamma distribution (probability is > 95%). To describe the evolution of the distribution of non-metallic inclusions during weld formation, the authors proposed to apply a probabilistic model in the form of gamma-distribution with time-dependent parameters. 14 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Key words: low-alloy steel, welding, weld metal, non-metallic inclusions, distribution

Надійшла до редакції 12.10.2021

Розроблено в ІЕЗ

Обладнання для лазерного зварювання в вакуумі

Обладнання призначено для отримання зварних з'єднань низьколегованих і легованих сталей, титанових, нікелевих, мідних та інших сплавів, а також алюмінієвих, магнієвих і берилієвих сплавів. Відмінною особливістю обладнання є можливість зварювання з подачею однієї або двох присадних дротів, що підігріваються. Потужність лазерного випромінювання 0,2...5 кВт (при необхідності може бути збільшена). Розміри вакуумної камери, кількість ступенів свободи та робочий хід приводів маніпулятора в вакуумній камері виготовляються залежно від габаритів і форми поверхні зварюваних деталей.

Лазерне зварювання в вакуумі (LWV) дає результати, порівнянні з результатами електронно-променевого зварювання (EBW) при аналогічній потужності променя.

Переваги LWV у порівнянні з EBW:

- в 100...1000 разів менша глибина вакууму
- набагато менші габарити зварювальних головок, простіше вакуумне обладнання та менший час вакуумування
- менша собівартість 1 м зварного шва та витрати на обслуговування обладнання

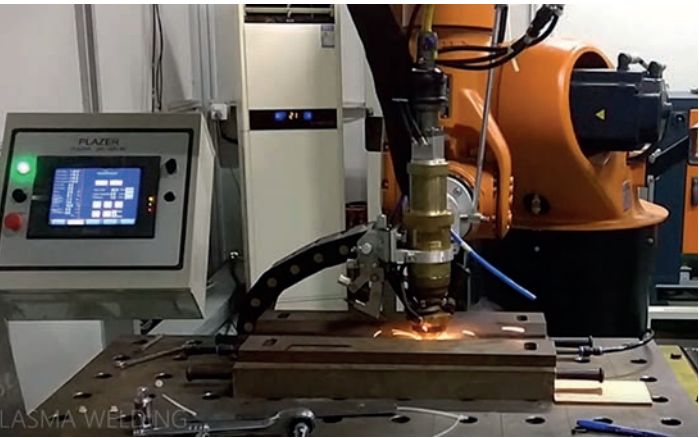


1 – вакуумна камера; 2 – вакуумний пост; 3 – комплект лазерного обладнання з системою охолодження; 4 – мобільна система управління



Установка для швидкісного гібридного лазерно-плазмового зварювання

Обладнання призначене для отримання зварних з'єднань низьколегованих і легованих сталей, титанових, нікелевих, мідних та інших сплавів, а також з алюмінієвих і магнієвих сплавів без та з подачею присадного дроту. Швидкість гібридного лазерно-плазмового зварювання вища на 30...60 % у порівнянні з лазерним зварюванням і в 2...3 рази у порівнянні з плазмовим зварюванням для однієї і тієї ж товщини зварюваних деталей.



Технічні характеристики	
Потужність, кВт:	
- лазерне випромінювання	0,2...5,0
- плазмової дуги	0,2...10,0
Робочий струм плазмової дуги, А	
- прямої полярності	10...320
- різнополярний асиметричний	10...320
Робоча напруга плазмової дуги, В:	
- прямої полярності	12...28
- зворотної полярності	24...36
Витрати газів, л/хв:	
- плазмоутворюючого (Ar)	1,0...10,0
- захисного (Ar; Ar + CO ₂)	0,4...40
Тиск робочих газів на вході в систему газопідготовки, бар	2...4
Швидкість подачі присадного дроту, м/год	0...420
Діаметри присадного дроту, мм	0,8...1,6

СТІЙКІСТЬ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ З БІФІЛЯРНОЮ СХЕМОЮ ЖИВЛЕННЯ БЕЗ ВИРІВНЮВАЛЬНОГО ДРОТУ

Ю.М. Ланкін, В.Г. Соловйов, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова

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

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) дротяними електродами з біфілярною схемою підключення живлення без зрівняльного дроту в даний час не застосовується. Є підстави вважати, що біфілярне ЕШЗ без зрівняльного дроту має переваги перед біфілярним електрошлаковим переплавом (ЕШП) без зрівняльного дроту. Тому потрібні додаткові дослідження процесу біфілярної ЕШЗ без зрівняльного дроту. Проведено дослідження та визначено діапазон параметрів стійкого процесу ЕШЗ з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту за допомогою математичного експерименту. Причинами розбалансу процесу можуть бути тимчасове порушення швидкості подачі одного з електродів, місцева зміна перерізу електрода, асиметричне розташування електродів в шлаковій ванні та ін. Введено поняття «стійкість до зовнішніх факторів». В якості міри стійкості запропоновано використати максимальне значення параметра REI, вище за яке процес переходить в нестійкий режим. Отримано номограму REI в залежності від напруги зварювання і швидкості подачі електродів, яка дозволяє вибрати режим біфілярного ЕШЗ з найбільшою стійкістю до дій зовнішніх збурюючих факторів. На математичній моделі показано, що процес біфілярної ЕШЗ без зрівняльного дроту може протікати стійко в певній зоні значень параметрів технологічного режиму. Бібліогр. 4, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, біфілярна схема, шлакова ванна, металева ванна, електропровідність

У 1960-х роках в ІЕЗ ім. Є.О. Патона був розроблений новий спосіб електрошлакового переплаву (ЕШП) – так званий біфілярний електрошлаковий переплав. Суть способу полягає в тому, що в біфілярній печі два витратні електроди підключені послідовно до вторинної обмотки однофазного трансформатора. Доведено, що біфілярний електрошлаковий переплав має більше переваг перед канонічним двохелектродним монофілярним ЕШП [1], оскільки установки, які працюють за цією схемою, витрачають менше електроенергії, більш продуктивні та мають вищий коефіцієнт потужності. Особливо великі їх переваги при виробництві злитків-слябів і листових злитків. Проте, разом з перевагами (такими, як сприятливе розташування зон основного тепловиділення в шлаковій ванні, зменшення реактивного опору пічного навантаження) біфілярна піч ЕШП без зрівняльного дроту виявилася працездатною лише в певному діапазоні режимів переплаву внаслідок неефективного саморегулювання. Тобто, при певних короткочасних зовнішніх збуреннях, які діяли на процес, процес ставав нестабільним. Для усунення цього недоліку зі збереженням переваг біфілярної схеми ЕШП вторинна обмотка живлячого трансформатора виконується з середньою точкою, підключеною зрівняльним дротом до зварюваного виробу.

Що стосується біфілярної ЕШЗ дротяними електродами без зрівняльного дроту, то така технологія до теперішнього часу не застосовувала-

ся. Є підстави вважати, що біфілярне ЕШЗ без зрівняльного дроту має переваги перед біфілярною ЕШП без зрівняльного дроту. Оскільки площа перерізу плавких електродів в ЕШЗ і ЕШП значно відрізняється, то істотно відрізняються і теплофізичні процеси, що обумовлюють їх плавлення. Аналіз картини розтікання струму в шлаковій ванні біфілярної печі ЕШП без зрівняльного (нульового) дроту [1] виконаний за спрощеною двохкоординатною (2D) електричною схемою. При цьому не враховувалось розтікання струму по кромках виробу та повзунах. Запропоноване співвідношення між струмом, що протікає через шлак і металеву ванну (10...30 %), і струмом, що протікає тільки між електродами в шлаковій ванні (90...70 %), вимагає уточнення в трьохкоординатному (3D) вимірі. Тому потрібні додаткові дослідження процесу біфілярної ЕШЗ без зрівняльного дроту. Нові дані внесуть коригування в діапазон параметрів для стійкого процесу ЕШЗ.

Метою роботи є дослідження та визначення діапазону параметрів стійкого процесу ЕШЗ з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту за допомогою математичного експерименту.

Математичний експеримент був проведений за допомогою раніше створеної моделі [2]. У вказаній роботі проведено математичні експерименти з двохелектродними ЕШЗ, підключеними до джерела живлення за канонічною схемою та біфілярною схемою із зрівняльним дротом. Для дослідження

розподілу електричного поля, струму і потенціалу в шлаковій ванні, в зварюваному виробі, в шві, що утворюється, і повзунах, а також розподілу тепла в об'ємі досліджуваної зони використовувалася її скінченно-елементна модель у складі шлакової і металеві ванни, двох повзунів, двох електродів, занурених в шлакову ванну, а також фрагментів виробу і зварювального шва. У зв'язку з тим, що схема підключення зварного обладнання до джерела живлення є зовнішніми умовами для моделі та не змінюють ні графічних, ні фізичних характеристик моделі досліджуваної зони ЕШЗ, прийнято рішення використати цю модель для проведення математичного експерименту при дослідженні та визначенні параметрів стійкого процесу ЕШЗ з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту. При цьому кабелі вторинної обмотки трансформатора ізолюються від заземлювальної клеми джерела живлення. На рис. 1 наведено схему живлення ЕШЗ.

При біфілярній схемі живлення ЕШЗ без зрівняльного дроту струм в шлаковій ванні проходить по двох узагальнених ланцюгах: «електрод е1 – шлакова ванна – електрод е2»; «електрод е1 – шлакова ванна – виріб – шлакова ванна – електрод е2». Мається на увазі, що струм, що протікає по виробу, це струм через металеву ванну, кромки виробу та повзуни. Величина струму в кожному з вказаних ланцюгів залежить від їх електричної провідності, яка у свою чергу залежить від складу флюсу, марок використовуваних металів, а також від температурного стану кожного елементарного об'єму даної зони зварювального процесу, через який протікає струм. Потенціал обох кромок виробу, повзунів, зварного шва та металеві ванни має практично рівне значення у зв'язку з їх малим питомим опором в порівнянні з більш високим питомим опором шлакової ванни. Крім того, в цілях електричної безпеки обслуговуючого персоналу установка ЕШЗ і виріб мають заземлення.

При зміні напруги живлення ЕШЗ і/чи швидкості подачі електродів в шлакову ванну змінюється

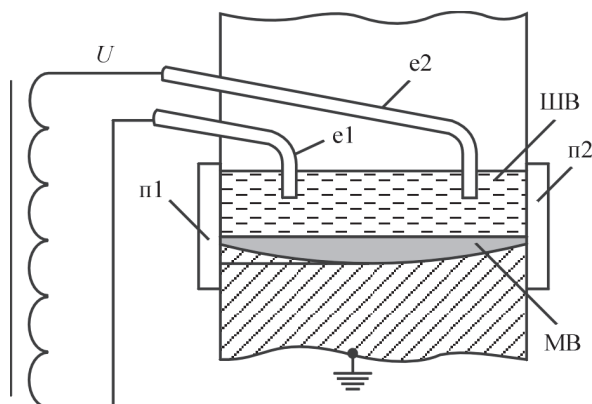


Рис. 1. Двохелектродна біфілярна схема живлення ЕШЗ без зрівняльного дроту (U – напруга джерела живлення; е1 і е2 – плавкі електроди; п1 і п2 – повзуни, охолоджувані водою; ШВ, МВ – шлакова та металева ванни)

ся величина заглиблення електродів і швидкість їх сплавлення. При цьому змінюється провідність кожного з вказаних ланцюгів і розподіл кількості тепла, що виділяється в шлаку. У зв'язку з тим, що в біфілярній схемі в обох електродах протікає один і той же струм, між процесами саморегулювання швидкості сплавлення кожного з них виникає зворотний зв'язок. Тому для біфілярної схеми важливе дотримання балансу між швидкостями сплавлення електродів, оскільки зміна зворотного зв'язку саморегулювання в електродах з негативного до позитивного може призвести до нестабільності протікання процесу ЕШЗ. Причинами розбалансу можуть бути тимчасове порушення швидкості подачі одного з електродів, місцева зміна перерізу електрода, асиметричне розташування електродів в шлаковій ванні та ін. Приклад асиметричного протікання процесу ЕШЗ наведено на рис. 2.

Для розуміння того, як змінюються електричні характеристики електрошлакового процесу при внесенні в нього різних збурень, наприклад, при зміні швидкостей подачі електродів в шлакову ванну, у лабораторних умовах в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України був проведений фізичний експеримент біфілярного ЕШП в графітовий кокіль з використанням апарату АД-381Ш [3]. Переплав виконаний з біфілярною схемою підключення джерела живлення без зрівняльного дроту із заземленим стендом. Технологічні параметри експериментального переплаву: внутрішні розміри кокіля 80×30 мм, відстань між електродами 40 мм (при симетричному розташуванні електродів один відносно іншого); глибина шлакової ванни 50...70 мм; діаметр електродного дроту 3 мм; кількість електродів 2.

Мета випробувань полягала в тому, щоб при напрузі живлення $U = 85$ В, змінюючи в процесі переплаву в певному інтервалі швидкість подачі електрода е2 (при незмінній швидкості подачі електрода е1), провести безперервний запис на електронний носій таких параметрів, як швид-

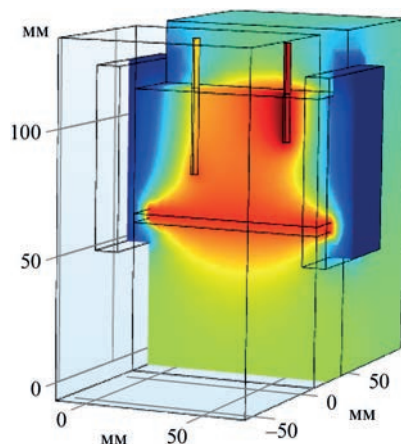


Рис. 2. Фрагмент графічної частини моделі (у розрізі) при виниклій асиметрії протікання процесу ЕШЗ

кість подачі електрода е1 – $V_{\text{под1}}$, швидкість подачі електрода е2 – $V_{\text{под2}}$, напругу між мундштуком електрода е1 і виробом U_1 , напругу між виробом і мундштуком електрода е2 – U_2 , а також струм джерела живлення $I_{\text{зв}}$ (рис. 3).

На рис. 3 видно, як при зміні $V_{\text{под2}}$ змінюється напруга між електродами та виробом U_1 і U_2 . Сума цих напруг дорівнює напрузі джерела живлення 85 В. В інтервалі τ_1 – τ_2 $V_{\text{под2}}$ менше $V_{\text{под1}}$, в результаті зменшується заглиблення електрода е2 (рис. 2), зменшується провідність каналу «електрод е2 – виріб», струм джерела живлення зменшується, а напруга U_2 між електродом е2 і виробом збільшується. Відповідно зменшується напруга між електродом е1 і виробом $U_1 = U - U_2$. На цьому інтервалі часу при малій $V_{\text{под2}}$ напруга U_1 досягає критично малого значення 7,1 В. При цьому електрод е2 досягає мінімуму заглиблення в шлакову ванну і струм $I_{\text{зв}}$ різко падає з 350 до 290 А. Аналогічна ситуація спостерігається у момент часу τ_3 , коли електрод е1 досягає мінімуму заглиблення в шлакову ванну при критичному значенні напруги $U_2 = 9,9$ В. При цьому струм $I_{\text{зв}}$ різко падає з 460 до 300 А.

Цей фізичний експеримент показав, що при деяких поєднаннях значень параметрів електрошлакового процесу та зовнішніх збурень можливий зрив стабільності протікання процесу. Для технолога, який розробляє процес плавки, важливо знати робочу зону значень параметрів і рівень стійкості процесу до зовнішніх збурень. Введемо поняття, що характеризує електрошлаковий процес з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту – «стійкість до зовнішніх факторів». В якості міри стійкості пропонується використати максимальне значення параметра REI, вище за яке процес переходить в нестійкий режим. REI визначається таким чином:

$$\Delta U = |U_1 - U_2|; \text{rei} = \left| \frac{\Delta U}{U} \right| \cdot 100 \%,$$

де rei – проміжне значення зовнішнього фактору, %; $\text{REI} = \max(\text{rei})$ – межа режиму стійкого протікання процесу. Стійкий режим знаходиться в діапазоні $0 \leq \text{rei} < \text{REI}$.

При біфілярній ЕШЗ будь-яка зовнішня дія, що призводить до розбалансу швидкостей сплаву електродів, завжди призводить до значення $\Delta U > 0$. Тому при обчислювальному експерименті розбаланс можна задавати в моделі шляхом зміни ΔU , як джерела розбалансу, що є універсальним.

Фізичні властивості матеріалів, що використовувалися в моделі

Параметр	Виріб	Електроди	Шлак	Повзуни	Шов
Теплоємність (C_p), Дж/(кг·К)	$C_p[T]$	$C_p[T]$	1400	385	$C_p[T]$
Відносна діелектрична проникність (ϵ)	1	1	2,5	1	1
Щільність (ρ), кг/м ³	$\rho[T]$	$\rho[T]$	2600	8960	$\rho[T]$
Теплопровідність (k), Вт/(м·К)	$k[T]$	$k[T]$	295	400	$k[T]$
Коеф. температурного розширення (α), 1/К	$\alpha[T]$	$\alpha[T]$	-	$17E-6$	$\alpha[T]$
Питома електропровідність (σ), См/м	$\sigma_{st}[T]$	$\sigma_{st}[T]$	$\sigma_{sh}[T]$	$6E7$	$\sigma_{st}[T]$

Для обчислювального експерименту прийнято наступні параметри моделі: $U = 85$ В; $V_{\text{под1}} = 280$ м/год; товщина виробу 80 мм; ширина проміжку 30 мм; глибина шлакової ванни 50 мм; відстань між електродами 40 мм; матеріал виробу – сталь 09Г2С; електродний дріт – сталь Св.08Г2С; флюс АН-8; формувальні повзуни – мідь. Фізичні властивості матеріалів наведені в таблиці [4].

Параметри $C_p[T]$, $\rho[T]$, $k[T]$, $\alpha[T]$, $\sigma_{st}[T]$, $\sigma_{sh}[T]$ задані відповідними апроксимуючими залежностями від температури T , К (в статті не наводяться).

В результаті обчислювального експерименту отримано максимальне значення короткочасного збурюючого фактору. Знайдена межа, при якій зворотний зв'язок між процесами саморегулювання швидкостей сплаву обох електродів переходить з негативного зворотного зв'язку до позитивного (рис. 4).

Максимальне значення збурення, вище за яке процес переходить в нестабільний стан, $\Delta U = 14,4$ В. При $U = 85$ В значення стійкості має бути:

$$\text{REI} = \frac{14,4}{85} \cdot 100 \% = 19,9 \, \%.$$

При довготривалій дії зовнішнього фактору, значення якого менше REI, процес прийме стійкий стан з різною величиною заглиблення електродів в шлакову ванну, що приведе до асиметричності

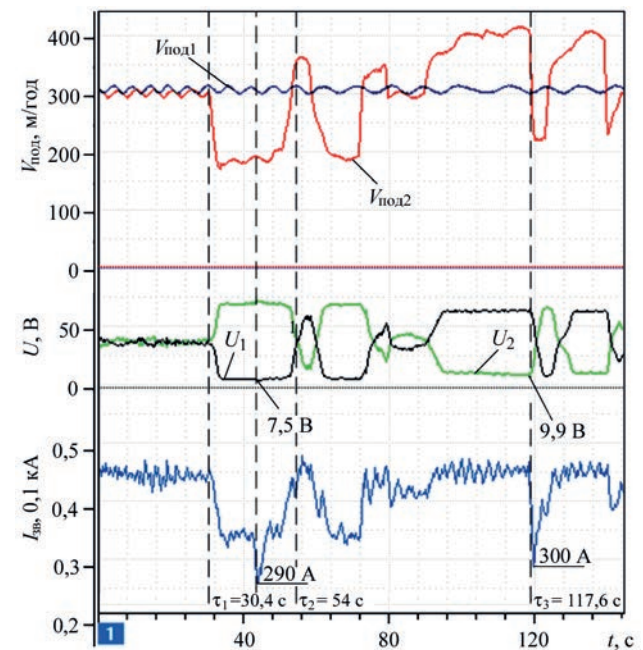


Рис. 3. Залежності змін в часі параметрів ЕШП з імітацією зовнішніх збурень

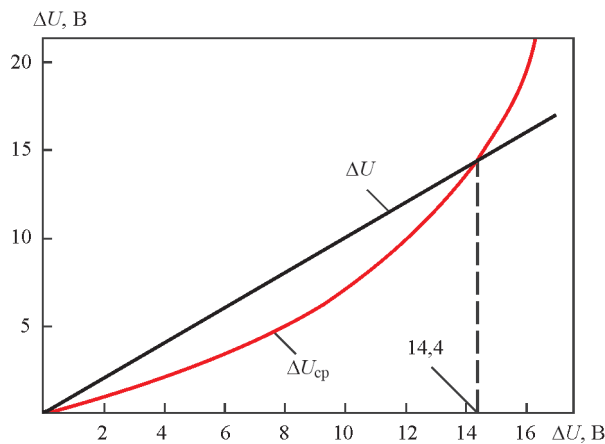


Рис. 4. Результат саморегулювання швидкостей сплаву електродів (ΔU – величина збурюючого фактору, В; $\Delta U_{\text{ср}}$ – відповідна реакція процесу в результаті саморегулювання швидкостей сплавлення електродів, В)

теплого поля та може призвести до порушення рівномірності проплавлення кромки виробу.

На створеній моделі проведено обчислення REI для різних поєднань значень U і $V_{\text{под}}$. Отримано номограму $REI = F[U, V_{\text{под}}]$ (рис. 5), яка дозволяє вибрати режим біфілярного ЕШЗ без зрівняльного дроту з найбільшою стійкістю до дій зовнішніх збурюючих факторів. При розрахунку REI задавалися обмеження для моделі, при яких процес біфілярної ЕШЗ імовірно має бути стабільним, це:

- температура нижніх торців електродів не виходить за межі 1500...2000 °С;
- величина заглиблення електродів не виходить за межі 2...48 мм;
- обов’язкова наявність негативного зворотного зв’язку між процесами саморегулювання обох електродів.

Дослідження умов розтікання струму в шлаковій ванні і виробі, проведене на моделі, показало, що залежно від режиму ЕШЗ (напруга, швидкість подання електродів, геометричні параметри зварної зони, розміщення електродів в шлаковій ванні) від 33 до 85 % струму протікає між електродами через шлакову ванну, тоді як інша частина струму (15...67 %) протікає через шлак і виріб, вклю-

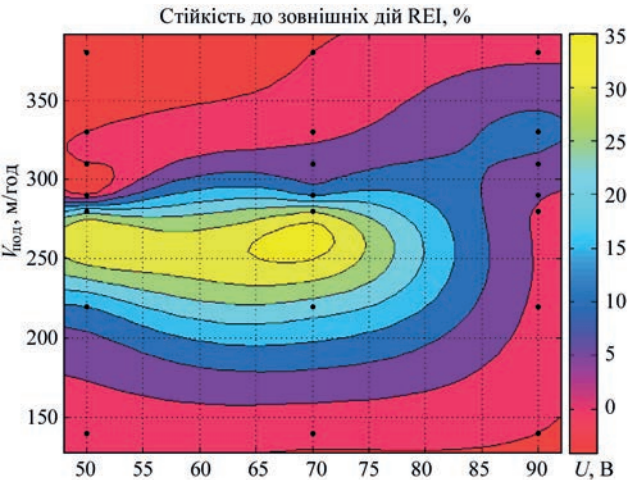


Рис. 5. Номограма стійкості процесу біфілярної ЕШЗ

чаючи повзуни. Це дозволяє припустити, що для режимів біфілярної ЕШЗ без зрівняльного дроту, які характеризуються значними значеннями струмів, що протікають через виріб, вплив зворотного зв’язку між саморегулюванням кожного з електродів буде зменшений і це дозволить збільшити діапазон стійкості процесу ЕШЗ. Це може бути предметом подальших досліджень.

Висновки

1. Для біфілярної схеми ЕШЗ важливо дотримуватись балансу між процесами зплавлення обох електродів. Причинами розбалансу можуть бути тимчасове порушення швидкості подачі одного з електродів, місцева зміна перерізу електрода, асиметричне розташування електродів в шлаковій ванні та ін.

2. Введено поняття «стійкість до зовнішніх факторів» для біфілярних ЕШЗ без зрівняльного дроту. В якості міри стійкості запропоновано використати максимальне значення параметра REI, вище за яке процес переходить в нестійкий режим.

3. Отримано номограму REI в залежності від напруги зварювання і швидкості подачі електродів, яка дозволяє вибрати режим біфілярного ЕШЗ з найбільшою стійкістю до дій зовнішніх збурюючих факторів.

4. На математичній моделі показано, що процес біфілярного ЕШЗ без зрівняльного дроту може протікати стійко в певній зоні значень параметрів технологічного режиму.

5. Створена модель може бути використана для прогнозування параметрів стійкого процесу біфілярного ЕШЗ після випробувань на фізичній моделі.

Список літератури

1. (1976) *Электрошлаковые печи*. Патон Б.Е., Медовар Б.И. (ред.). Киев, Наукова думка.

2. Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю. (2021) Порівняння процесів електрошлакового зварювання при підключенні електричного живлення за двоелектродною канонічною та біфілярною схемою. *Автоматичне зварювання*, 11, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.05>

3. Ланкін Ю.Н., Москаленко А.А., Тюкалов В.Г. и др. (2008) *Применение электрошлаковой сварки в строительстве и при ремонте металлургических агрегатов*. Сварщик, 1, 6–9.

4. (1989) *Марочник сталей и сплавов*. Сорокин В.Г. (ред.). Москва, Машиностроение.

References

1. (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

2. Lankin, Yu.M., Soloviov, V.G., Tyukalov, V.G., Romanova, I.Yu. (2021) Comparison of electroslag welding processes at power connection with two-electrode conventional and bifilar diagram. *The Paton Welding J.*, 11, 40–43.

3. Lankin, Yu.M., Moskalenko, A.A., Tyukalov V.G. et al. (2008) Application of electroslag welding in construction and repair of metallurgical installations. *Svarshchik*, 1, 6–9 [in Russian].

4. (1989) *Grades of steels and alloys*. Ed. by V.G. Sorokin. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

STABILITY OF THE PROCESS OF ELECTROSLAG WELDING WITH BIFILAR POWER CIRCUIT WITHOUT EQUALIZING WIRE

Yu.M. Lankin, V.G. Solovyov, V.G. Tyukalov, I.Yu. Romanova

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

E-mail: hhsova@gmail.com

Electroslag welding (ESW) by wire electrodes with bifilar circuit of power connection without equalizing wire is not applied now. There is reason to believe that bifilar ESW without the equalizing wire has certain advantages over bifilar electroslag remelting (ESR) without equalizing wire. Therefore, additional studies of the process of bifilar ESW without equalizing wire are required. Investigations were performed and the range of parameters of a stable process of ESW with a bifilar power circuit without an equalizing wire was determined, using a mathematical experiment. The causes for process unbalance can be temporary violation of the feed rate of one of the electrodes, local change of electrode cross-section, asymmetrical arrangement of the electrodes in the slag pool, etc. The notion of «resistance to external impact» (REI) was introduced. It was proposed to use as the measure of resistance, the maximum value of REI parameter, above which the process goes into an unstable mode. REI nomogram was obtained, depending on welding voltage and electrode feed rate, which allows selection of the mode of bifilar ESW with the highest resistance to external disturbances. A mathematical model was used to show that the process of bifilar ESW without an equalizing wire can run in a stable manner in a certain zone of values of the technological mode parameters. 4 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: electroslag welding, bifilar scheme, slag pool, metal pool, electric conductivity

Надійшла до редакції 13.10.2021

Розроблено в ІЕЗ

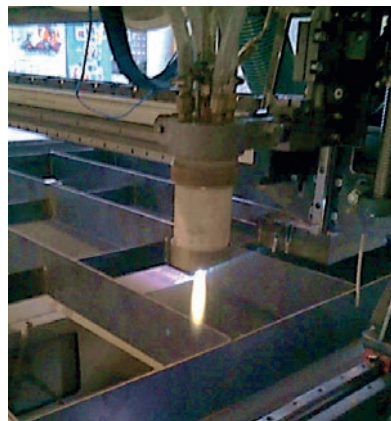
Плазмове різання металів підвищених товщин на зворотній полярності

Обладнання призначене для різання нержавіючих сталей, чорних і кольорових металів (алюмінієвих, мідних, титанових та інших сплавів) товщиною 5–150 мм і вище з використанням плазмової дуги постійного струму прямої дії та забезпечує ефективне різання металевих листів, а також різноманітного лиття.

Технічні характеристики обладнання

для плазмового різання металів на зворотній полярності

Напруга живлячої мережі при частоті 50 Гц, В 3 x 380;
Вихідна потужність, кВт до 250;
Напруга холостого ходу, В. до 700;
Робоча напруга на дузі, В 200...650
Діапазон регулювання робочого струму дуги, А. 50...400
Крутизна (диференційний опір) зовнішньої характеристики, В/А . . . більше 20
Витрата плазмоутворювального газу (повітря), м³/год 5...35
Тиск повітря в мережі, МПа 0,8...1,0
Витрата плазмоутворювального повітря, м³/год 5...35



Зовнішній вигляд обладнання для плазмового різання на зворотній полярності

Фото поверхні різів пластин після плазмового різання на зворотній полярності



низьколегована конструкційна сталь (товщина 100 мм)



легована нержавіюча сталь (товщина 130 мм)

Пайка – перспективний метод отримання з'єднань

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



Модель дивертора Cu-W



Елемент дивертора Мо - С



Модель дивертора C - Мо - SS



Теплообмінник Stainless steel IC 321



Трубчасті з'єднання Al + stainless steel IC 321



Антенна Al (3003)



Центробіжне колесо IN 718



Вузол фотоприймача Ti - Kovar



Трубчасте з'єднання Stainless steel IC 321



Бурильний інструмент (твердосплавні сплави)



Елемент фотоприймача Ti - Kovar



Елементи теплообмінників Cu+Cu

ОТРИМАННЯ І ВЛАСТИВОСТІ ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ АМОРФІЗОВАНОГО СПЛАВУ FeMoNiCrB З ВВЕДЕННЯМ ЗМІЦНЮЮЧИХ ФАЗ

Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Т.В. Цимбаліста, А.І. Кільдій, К.В. Янцевич, З.Г. Іпатова

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

Досліджено структуру та властивості аморфізуючих композиційних детонаційних покриттів на основі FeMoNiCrB-сплаву. Для нанесення покриттів були використані композиційні порошки FeMoNiCrB + ZrB₂, FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C, FeMoNiCrB + FeTiO₃, отримані з суміші порошків композицій методом механічного легування. Встановлено, що в результаті детонаційного напilenня всіх складів порошків сформовані покриття мають щільну, ламелярну, багатофазну структуру. Склад покриттів включає тверді розчини Fe(Ni,Cr), бориди Mo₂FeB₂ і Fe₂B, дисперсні включення легуючих добавок (ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃) і оксидів (ZrO₂ і FeCr₂O₄ або Fe₂O₃, або Fe₃O₄), а також аморфну фазу, кількість якої в структурі покриттів в результаті процесу детонаційного напilenня зростає. Приведені показники мікротвердості, корозійної стійкості, довговічності та зносостійкості композиційних детонаційних покриттів. Бібліогр. 12, табл. 6, рис. 4.

Ключові слова: детонаційне напilenня, композиційні порошки, аморфізуючий залізний сплав, борид цирконію, карбід титану-хрому, титанат заліза, покриття, корозійна стійкість, зносостійкість

Комплекс особливих фізико-хімічних і механічних характеристик, виявлених у матеріалів з аморфною структурою, зумовив широкі перспективи їх практичного використання для розробки захисних покриттів, що працюють в умовах підвищеного зношення та корозії, а також для отримання покриттів зі спеціальними властивостями (магнітними, резистивними, радіаційностійкими та ін.) [1–3].

Одним із способів отримання покриттів з аморфною структурою є газотермічне напilenня покриттів [3].

Важливою перевагою газотермічного напilenня (ГТН) при отриманні металевих матеріалів з аморфною структурою (ММА) перед іншими способами (спінінгування розплаву, екструзія розплаву, отримання тонких шарів ММА з використанням лазера, випаровування в вакуумі, магнетронного розпилення та ін.), які дозволяють отримувати фольги, стрічки товщиною не більше 10...150 мкм, є можливість формування шарів матеріалу покриття з аморфною структурою товщиною до кілька мм. Основа технології ГТН покриттів з аморфною структурою полягає в забезпеченні швидкості охолодження частинок розплаву матеріалу, що напильються, в момент формування покриття на поверхні основи не нижче величини критичного значення, що є характеристикою кожного аморфізуючого сплаву. Основна маса таких сплавів на Ni-, Fe- та Co-основі має таку характеристику в межах 10⁵...10⁶ К/с [1, 3], що можливо забезпечити в умовах ГТН відповідним підбором розмірів частинок,

що напильються, параметрів процесу напilenня та системи охолодження виробу, на який напильється покриття, під час використання практично всіх методів ГТН (газополуменового, плазмове-го і детонаційного). Однак при газополуменовому і плазмове-му напilenні прямий вплив високотемпературного газового струменя на напильовану поверхню вимагає розробки спеціальних умов охолодження зони напilenня, щоб уникнути зниження швидкості падіння температури частинок, що напильються, нижче необхідної. У зв'язку з цим умови детонаційного напilenня є більш сприятливими для забезпечення необхідних для формування аморфного стану структури напильованого покриття швидкостей охолодження розплаву частинок, що напильються. З іншого боку більш високі швидкості частинок розплаву при детонаційному напilenні призводять при їх ударі об поверхню основи до формування деформованих частинок-сплетів меншої товщини, що забезпечує більш високі швидкості охолодження напильованого матеріалу і сприяє аморфізації матеріалу покриття.

Накопичений досвід детонаційного напilenня аморфних покриттів показав перспективність і ефективність їх практичного застосування для відновлення деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) (Fe₆₉B₁₅C₁₀Si₆, Fe₇₀Cr₁₀B₂₀, Fe₇₀Cr₁₀P₁₃C₇), зміцнення деталей металорізальних верстатів і штампового інструмента (Fe₆₁B₃₇C₂, Fe₆₇Ti₇B₂₄C, Ni₃B), для захисту від зносу та корозії деталей хімічного машинобудування (Fe₇₀Cr₁₀P₁₃C₇, Ni₄₀Ti₄₀Si₂₀) [3]. Одним з напрямків подальшого

Борисов Ю.С. – <https://orcid.org/0000-0002-6019-8464>, Борисова А.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-7376-3370>, Цимбаліста Т.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9569-7776>, Кільдій А.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8133-8705>, Янцевич К.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3975-7727>, Іпатова З.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-2209-408X>
© Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Т.В. Цимбаліста, А.І. Кільдій, К.В. Янцевич, З.Г. Іпатова, 2021

розвитку технологій детонаційного напilenня покриттів з аморфізованою структурою, яка може привести до підвищення їх службових властивостей і розширення областей застосування, є розробка детонаційних композиційних покриттів на базі сплавів з аморфною структурою.

Метою цієї роботи було вивчення процесу формування структури та визначення властивостей детонаційних покриттів з композиційних порошків на базі сплаву FeMoNiCrB з добавками ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃, що одержуються методом механічного легування.

Об’єкти дослідження і методика експерименту. Для детонаційного напilenня покриттів використовували композиційні порошки, отримані методом механічного легування з суміші порошку аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з 30 об. % тугоплавких сполук ZrB₂, (Ti, Cr)C і FeTiO₃. Методика отримання композиційних порошків детально описана в роботі [4], а їх характеристика представлена в табл. 1.

Детонаційне напilenня покриттів проводили на установці «Перун-С» з використанням в якості детонуючої суміші пропан-бутану (50 % C₃H₈ + 50 % C₄H₁₀) з киснем у співвідношенні 1:3 з додаванням повітря. В якості транспортуючого газу використовували повітря (табл. 2). Дистанція напilenня була постійною – 110 мм, частота проходження циклів становила 6,6 с⁻¹.

Для дослідження структури та фазового складу покриттів використовували методи металографії (мікроскоп «Неофот-32», оснащений приставкою для цифрової зйомки); рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) виконували на дифрактометрі ДРОН-3 в CuKα-випромінюванні з графітовим монохроматором при кроковому переміщенні 0,1°

Таблиця 1. Характеристика вихідних порошків

Порошок	Розмір частинок, мкм	Густина ρ, г/см ³	Мікротвердість, МПа	Фазовий склад
FeMoNiCrB, (Fe – 36,2; Mo – 29,9; Ni – 23,6; Cr – 7,6; B – 2,7)	63...100	7,84	6170±1170	Тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , Fe ₂ B, Cr ₂ B
FeMoNiCrB + ZrB ₂	<80	7,42	6020±1280	Тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , ZrB ₂ , АФ
FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C	<40	7,283	5650±1100	Тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , (Ti,Cr)C, Cr ₃ C ₂ , АФ
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	<80	7,52	5050±660	Тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , FeTiO ₃ , АФ

Таблиця 2. Режими напilenня детонаційних покриттів

Порошок	Витрата детонуючої суміші, м ³ /год			Витрата транспортуючого газу (повітря), м ³ /год
	Пропан-бутан C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀	Кисень	Повітря	
FeMoNiCrB	0,5	1,55	0,5	0,65
FeMoNiCrB + ZrB ₂	0,5	1,55	0,9	0,35
FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C	0,5	1,55	0,9	0,35
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	0,5	1,55	0,9	0,35

та часом експозиції в кожній точці 4 с з подальшою комп’ютерною обробкою отриманих цифрових даних. Ідентифікацію фаз проводили з використанням бази даних ASTM.

Корозійну стійкість детонаційних покриттів в розчинах 10 % H₂SO₄, 3 % NaCl, 5 % NaOH досліджували потенціостатичним методом на потенціостаті П-5827 М при швидкості розгортки 2 мВ/с з використанням спеціально сконструйованої притискної комірки, що забезпечує одnobічний доступ електроліту до покриття і не вимагає захисту неробочих поверхонь. В якості електрода порівняння застосовували хлорсрібний електрод, заповнений насиченим розчином хлористого калію, а допоміжним електродом слугувала платина. Підготовку зразків перед початком корозійних випробувань проводили згідно ГОСТ Р 9.905-2007 [5].

За експериментальними значеннями були побудовані катодні і анодні поляризаційні криві в координатах

$E_c = f(\lg i_c),$

де E_c – потенціал корозії, В; i_c – густина струму, А/см² [6, 7].

Швидкість і потенціал корозії покриттів визначали графічним методом по поляризаційним кривим шляхом екстраполяції тафелевих ділянок катодних і анодних кривих до $E = E_c$.

Використовуючи значення струмів корозії, визначених з поляризаційних кривих, був розрахований ваговий і глибинний показник корозії за формулами [6]:

$K_b = \frac{iA \cdot 1000}{nF},$

де K_b – ваговий показник корозії, г/м²·год; i – густина струму, А/см²; A – атомна вага металу, г/моль;

n – валентність іона металу, який перейшов у розчин; F – число Фарадея (26,8 А·год/моль).

$$K_{\pi} = K_{\text{в}} \frac{8,76}{\rho},$$

де K_{π} – глибинний показник корозії, мм/рік; ρ – густина металу, г/см³; 8,76 – перекладний коефіцієнт для переходу від вагового показника корозії до розрахунку на 1 год до глибинного показника до 1 року, розрахований з кількості годин на рік (24 год·365 = 8760 год) і розділений на 1000.

Для порівняльної характеристики корозійної стійкості була використана десятибальна шкала оцінки (ГОСТ 13819-69), заснована на використанні глибинного показника корозії (K_{π}) [6].

Зносостійкість покриттів досліджували в умовах абразивного зношування при терті о нежорстко закріпленій абразив (ГОСТ 23.208-79) [8]¹⁾. В якості матеріалу абразиву для випробувань застосовували пісок SiO₂ з твердістю 11 ГПа і карбід В₄С з мікротвердістю 45 ГПа; розмір частинок порошоків 250...300 мкм.

Показник зносостійкості покриття оцінювали за втратою маси зразка після проведення досліду з точністю 0,0001 г. Для кожного типу покриття досліджували три зразки.

Відносну зносостійкість (K_i) оцінювали за формулою [8]

$$K_i = \frac{G_e}{G_i} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_e},$$

де ρ_e , ρ_i – густини, а G_e , G_i – втрата маси еталонного і досліджуваного матеріалів, г.

В якості еталонного зразка використовували сталь 30ХГСА з твердістю H_B 212...248.

Результати експерименту та обговорення. Дослідження мікроструктури детонаційних по-

криттів (рис. 1) показало, що при напиленні як порошоків аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB, так і композиційних порошоків формуються щільні, однорідні по товщині покриття з ламелярною структурою, де спостерігається чергування світлих і темніших ламелей. Значення мікротвердості як темних, так і світлих ламелей змінюються в широких межах (табл. 3), при цьому в цілому можна відзначити її більш високі значення для темних ламелей, в яких, напевно, зосереджені оксидні включення. Якщо порівнювати усереднені значення мікротвердості покриттів в залежності від складу, то можна відзначити більш високі їх значення для КП з карбідом (Ti, Cr) C в порівнянні з боридами ZrB₂ і оксидом FeTiO₃. Така ж закономірність має місце в разі вихідних КП (табл. 1). Однак мікротвердість напилених покриттів виявилася нижче, ніж вихідних порошоків. Причина такої різниці цілком ймовірно полягає у відмінності вмісту в них аморфної фази [9].

Рентгеноструктурний фазовий аналіз детонаційних покриттів свідчить про те, що при напиленні КП всіх складів формується аморфно-кристалічна структура, про що свідчать великі області «галло» на рентгенограмах (рис. 2).

Дослідження кінетики електродних потенціалів детонаційних покриттів (рис. 3) показало, що їх значення стабілізуються через 15...40 хв після занурення зразків в електроліт. Так, у 3%-му розчині NaCl при введенні добавок ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃ відбувається зсув потенціалу корозії (E_c) в більш позитивну сторону від -0,35 до -0,28 В та гальмування катодної реакції виділення водню. Якщо в разі покриттів з порошку FeMoNiCrB струми корозії знаходяться в межах 4·10⁻⁶ А/см², то при введенні добавок вони практично для всіх

Таблиця 3. Характеристика детонаційних покриттів

РСФА	Склад	H_{μ}^* , МПа	Характеристика структури
АФ, тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , Fe ₂ B, Fe ₂ O ₃	FeMoNiCrB	4855±1023	Щільна однорідна структура з ледь помітною ламелярністю і невеликою кількістю темних дрібних (мабуть оксидних) включень (рис. 1, а)
АФ, тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , ZrB ₂ , Fe ₂ B, ZrO ₂ T, FeCr ₂ O ₄	FeMoNiCrB + ZrB ₂	3830±570	Щільна тонколамелярна структура зі світлими і темно-сірими ламелями, що чергуються, мікротвердість яких відрізняється незначно (відповідно 3270...4500 та 3040...5590 МПа) (рис. 1, б)
АФ, тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , (Ti, Cr)C, Fe ₂ B, Fe ₂ O ₃	FeMoNiCrB + (Ti, Cr)C	4450±700	Щільна ламелярна структура зі світлими включеннями округлої форми, мікротвердість яких змінюється в межах від 3800 до 5700 МПа (рис. 1, в)
АФ, тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , FeTiO ₃ , Fe ₂ B, Fe ₃ O ₄	FeMoNiCrB + FeTiO ₃	3750±620	Щільна тонколамелярна структура зі світлими ($H_{\mu} = 2220...4350$ МПа) темносірими ($H_{\mu} = 3000...3980$ МПа) ламелями з великою кількістю як світлих, так і темно-сірих включень (рис. 1, г)

¹⁾Дослідження були виконані за участю канд. техн. наук Лабунця В.Ф.

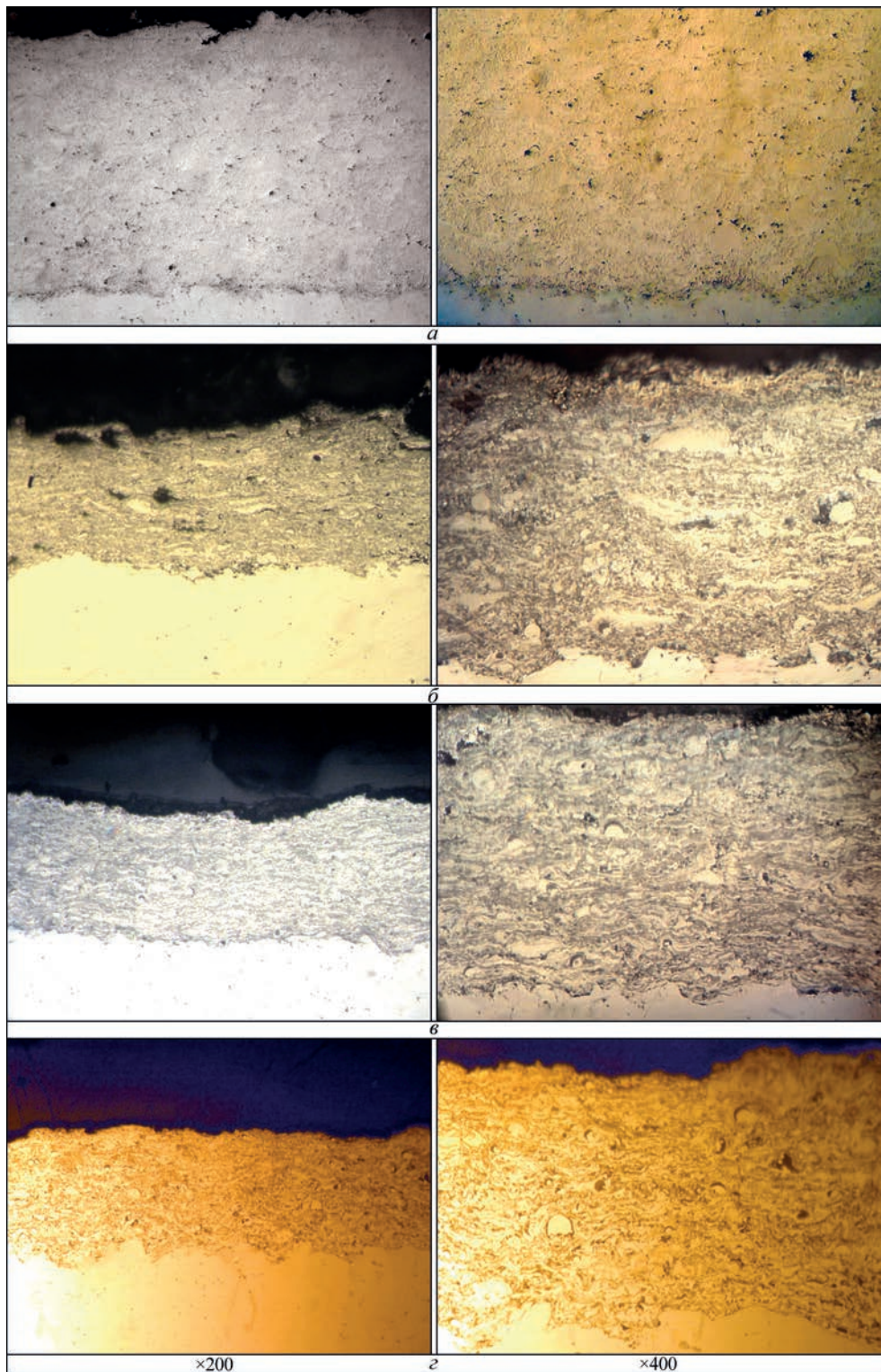


Рис. 1. Мікроструктура детонаційних покриттів, отриманих з порошків FeMoNiCrB (а), FeMoNiCrB + ZrB₂ (б), FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C (в), FeMoNiCrB + FeTiO₃ (г)

покриттів знижуються до $2 \dots 3 \cdot 10^{-6}$ А/см². Відсутність пасивації покриття в середовищі 3% NaCl може бути обумовлено тим, що цей розчин належить до агресивних середовищ з високим вмістом Cl⁻, в присутності якого відбувається поступове витіснення ним кисню з захисної плівки на поверхню електрода. При цьому анодний процес утворення захисного оксиду сповільнюється анод-

ним процесом утворення легкорозчинного з'єднання металів з Cl⁻ [10].

Дослідження електрохімічної поведінки детонаційних покриттів в 10%-му розчині H₂SO₄ показало, що введення ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃ призводить до зміщення потенціалу корозії в більш позитивну сторону від -0,12 до -0,044 В, корозійні процеси протікають з водневою деполя-

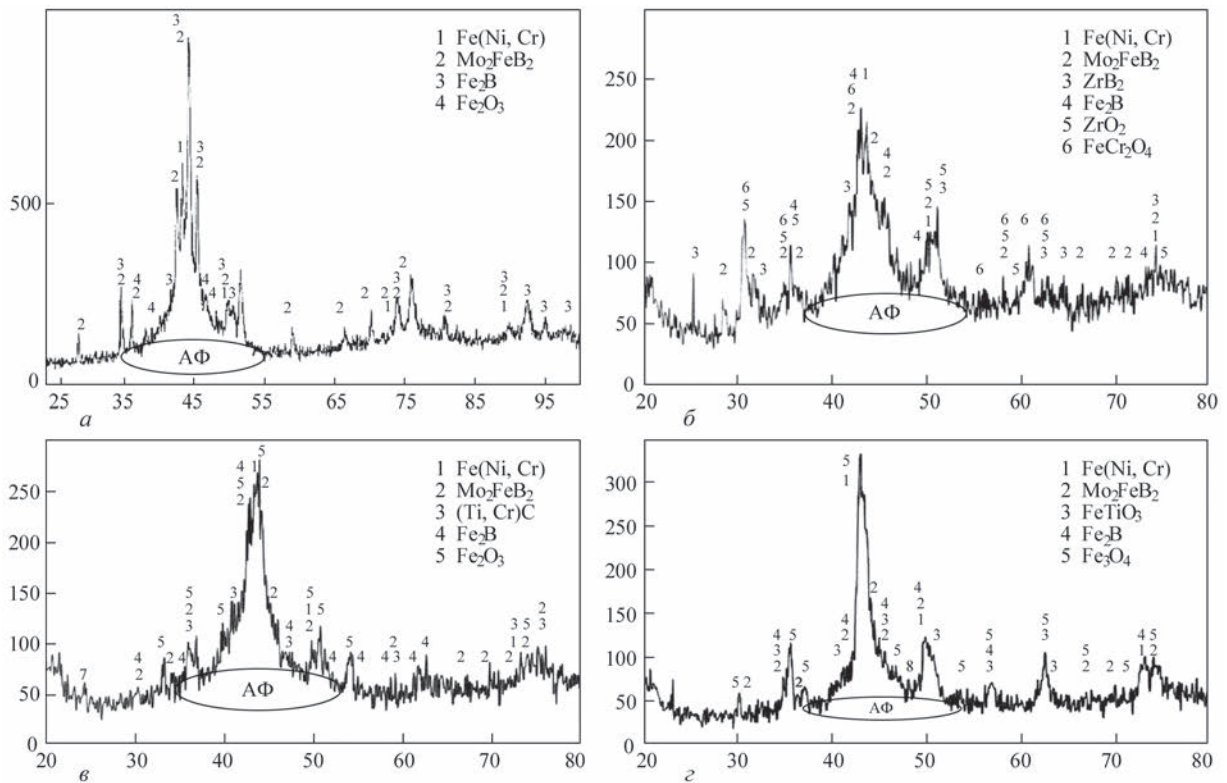


Рис. 2 – Рентгенограми детонаційних покриттів, отриманих з порошків: FeMoNiCrB (а), FeMoNiCrB + ZrB₂ (б) FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C (в), і FeMoNiCrB + FeTiO₃ (г)

ризацією, струми корозії знаходяться в межах $1,6 \dots 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$. Отримані анодні поляризаційні криві вказують на відсутність пасивації покриттів в широкому інтервалі потенціалів. Чисті хром і нікель в сірчаній кислоті добре пасивуються [11, 12], в той час як в покриттях, вихідний порошок яких включає ці метали, вони не переходять у пасивний стан. Це можна пояснити наявністю в структурі шару фаз Mo₂FeB₂, ZrB₂, TiC, які є катодами по відношенню до нікелю і хрому. Вони перешкоджають утворенню суцільних оксидних плівок на поверхні покриттів в розчині сірчаної кисло-

ти, в результаті чого система втрачає здатність до пасивації.

Електрохімічні дослідження детонаційних покриттів у 5%-му розчині NaOH показують, що при введенні добавок ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃ відбувається зміщення потенціалу корозії в позитивну сторону від $-0,48$ до $-0,34 \text{ V}$ та зниження струмів корозії з $5 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$.

Аналіз отриманих результатів (табл. 4) свідчить про те, що для всіх досліджених покриттів максимальна швидкість корозії має місце в розчині сірчаної кислоти, мінімальна в 3 % NaCl, тоб-

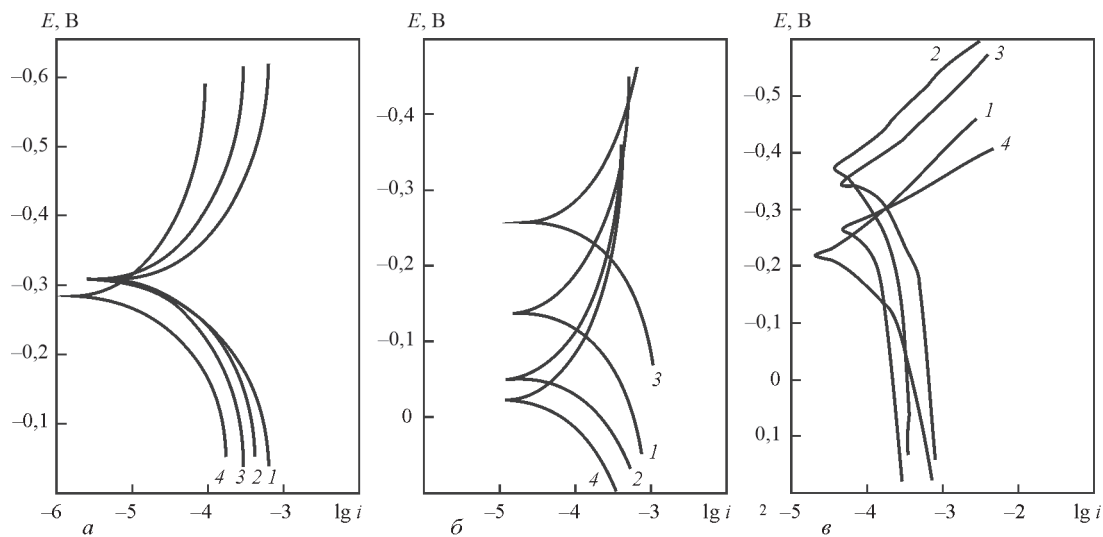


Рис. 3. Поляризаційні криві детонаційних покриттів: а – у 3% NaCl, б – у 10% розчині H₂SO₄, в – у NaOH (1 – FeMoNiCrB, 2 – FeMoNiCrB + ZrB₂, 3 – FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C, 4 – FeMoNiCrB + FeTiO₃)

Таблиця 4. Результати електрохімічних випробувань детонаційних покриттів (товщина покриття 500 мкм)

Склад покриття	Електроліт					
	3 % NaCl		5 % NaOH		10 % H ₂ SO ₄	
	<i>E</i> _c , В	<i>i</i> _c , А/см ²	<i>E</i> _c , В	<i>i</i> _c , А/см ²	<i>E</i> _c , В	<i>i</i> _c , А/см ²
FeMoNiCrB	−0,35	4·10 ^{−6}	−0,48	5·10 ^{−6}	−0,12	1,9·10 ^{−5}
FeMoNiCrB + ZrB ₂	−0,31	2,5·10 ^{−6}	−0,34	2·10 ^{−6}	−0,24	1,5·10 ^{−5}
FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C	−0,33	3·10 ^{−6}	−0,33	3·10 ^{−6}	−0,08	1,6·10 ^{−5}
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	−0,28	3·10 ^{−6}	−0,44	3·10 ^{−6}	−0,04	1,8·10 ^{−5}

Таблиця 5. Показники корозійної стійкості детонаційного КП на основі FeMoNiCrB

Склад покриття	Показник швидкості корозії			Термін служби, рік	Бал корозійної стійкості	Група корозійної стійкості
	K_v , г/м²·год	K_p , мм/рік				
3 % NaCl						
FeMoNiCrB	0,042	0,047		10,6	4	Стійкі
FeMoNiCrBi+ZrB ₂	0,026	0,029		17,2	4	->-
FeMoNiCrBi+(Ti,Cr)C	0,031	0,035		14,3	4	->-
FeMoNiCrB +FeTiO ₃	0,031	0,035		14,3	4	->-
5 % NaOH						
FeMoNiCrB	0,047	0,052		9,6	4	Стійкі
FeMoNiCrBi+ZrB ₂	0,033	0,038		13,1	4	->-
FeMoNiCrBi+(Ti,Cr)C	0,038	0,04		12,5	4	->-
FeMoNiCrB +FeTiO ₃	0,04	0,043		11,1	4	->-
10 % H ₂ SO ₄						
FeMoNiCrB	0,2	0,22		2,3	6	Зниженої стійкості
FeMoNiCrBi+ZrB ₂	0,156	0,174		2,8	6	->-
FeMoNiCrBi+(Ti,Cr)C	0,166	0,186		2,5	6	->-
FeMoNiCrB +FeTiO ₃	0,182	0,21		2,4	6	->-

то швидкість корозії корелює з величиною pH розчину і зменшується в області від слабокислих до нейтральних і лужних розчинів. Тому швидкість корозії в 10%-му розчині H₂SO₄ (pH 1) вище, ніж в нейтральному 3%-му NaCl (pH 8,0) і в лужному розчині 5%-му NaOH (pH 13).

Таким чином, електрохімічні випробування в досліджуваних розчинах показали, що в детонаційних покриттях з КП FeMoNiCrB + (ZrB₂, (Ti,Cr) C, FeTiO₃) струм корозії зменшується від 2·10^{−6} в 3 % NaCl та 5 % NaOH до 1,5·10^{−5} А/см² в 10 % H₂SO₄. Введення ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃ в усі покриття призводить до зниження величини струму корозії в 1,5...3,0 рази в порівнянні з матеріа-

лом основи FeMoNiCrB в залежності від роду добавки в напрямку FeTiO₃ → (Ti,Cr)C → ZrB₂.

На підставі отриманих експериментальних даних була проведена порівняльна оцінка довговічності досліджених покриттів однакової товщини в розглянутих корозійних середовищах. Результати розрахунку прогнозованого терміну служби досліджених покриттів при товщині 500 мкм наведені в табл. 5.

Результати випробувань зносостійкості детонаційних покриттів представлені в табл. 6 і на рис. 4.

При використанні абразиву SiO₂ найвища зносостійкість спостерігається у покриттів, отриманих з порошку FeMoNiCrB, а в разі абразиву B₄C найбільш зносостійким з розроблених композиційних покриттів є покриття, отримане з композиційного порошку FeMoNiCrB + 30 об. % (Ti,Cr)C. Це корелює з середньою мікротвердістю покриттів (див. табл. 3), яка у випадку КП FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C становить 4450 МПа проти ~ 3800 МПа в КП FeMoNiCrB + FeTiO₃ і КП FeMoNiCrB + ZrB₂.

Висновки

1. Покриття, нанесені детонаційним напilenням з композиційних порошків (КП) FeMoNiCrB – ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃, і порошку FeMoNiCrB, мають щільну ламелярну багатозфазну структуру. Мікротвердість FeMoNiCrB-покриття становить 4855 ± 1023 МПа, компози-

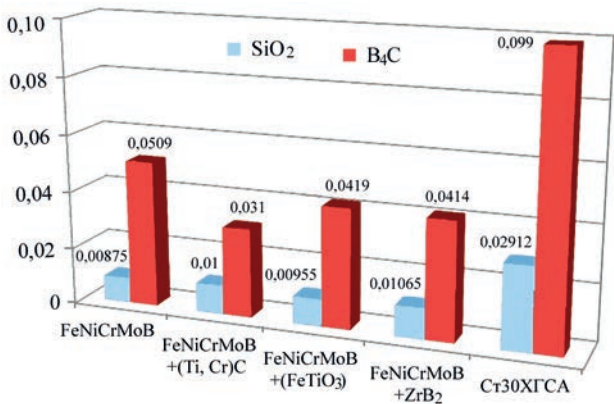


Рис. 4. Результати випробувань покриттів на зношення при терті об абразиви SiO₂ та B₄C, г/км

Таблиця 6. Результати випробувань детонаційних покриттів на основі FeMoNiCrB на абразивну зносостійкість при терті об нежорстко закріпленій абразив

Склад покриття	Абразив SiO ₂		Абразив В ₄ С	
	Приведений знос, г/км	Відносна зносо- стійкість	Приведений знос, г/км	Відносна зносостійкість
FeMoNiCrB	0,00875±0,00075	3,3	0,0509±0,002	1,9
FeMoNiCrB +ZrB ₂	0,01065±0,00015	2,6	0,0419±0,0003	2,3
FeMoNiCrB +(Ti,Cr)C	0,01±0	2,7	0,031±0,001	3,0
FeMoNiCrB +FeTiO ₃	0,00955±0,00595	2,9	0,0414±0,0003	2,3
Сталь 30ХГСА	0,0291±0,00145	-	0,099±0,0002	-

ційних покриттів FeMoNiCrB + (ZrB₂, (Ti,Cr) C, FeTiO – 3830 ± 570 МПа, 4450 ± 700 МПа і 3750 ± 620 МПа, відповідно.

2. Всі отримані покриття мають аморфно-кристалічну структуру. Склад всіх покриттів включає тверді розчини на основі Fe і (Fe,Ni) та боридні фази Мо₂FeВ₂, Fe₂В, оксиди, а також аморфну фазу, вміст якої в процесі напилення в порівнянні з порошком збільшується.

3. Проведені електрохімічні дослідження показали, що корозійна стійкість детонаційних покриттів залежить від рН розчину. У лужних і нейтральних середовищах корозійна стійкість покриттів на порядок вище, ніж в кислому середовищі, що обумовлено наявністю в ній аніонів SO₄⁻². Введення в покриття добавок ZrB₂, (Ti,Cr) C і FeTiO₃ знижує в 2...3 рази швидкість корозії в 3%-му розчині NaCl і 5%-му NaOH і слабо впливає на швидкість корозії в Н₂SO₄. Детонаційні покриття, які були досліджені в розчинах 3%-му NaCl і 5%-му NaOH віднесені, відповідно до ГОСТ 308-85 при товщині 500 мкм до стійких зі строком служби 14...17 років і 11...13 років відповідно, а в 10%-му Н₂SO₄ – до заниженостійких зі строком служби 2,4...2,8 років.

4. Дослідження зносостійкості детонаційних покриттів FeMoNiCrB і КП FeMoNiCrB в умовах зношування в незакріплених абразивах SiO₂ і В₄С показали, що показники відносної зносостійкості по відношенню до еталону «сталь 30ХГСА» складають 2,6...3,3 в середовищі SiO₂ і 1,9...2,9 – в середовищі В₄С. Найбільш висока зносостійкість 2,7...3,0 досягнута у випадку покриття FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C, що має мікротвердість 4450 ± 700 МПа.

Список літератури

1. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. (1987) *Аморфные металлы*. Москва, Металлургия.

2. Люборский Ф.Е. (1987) *Аморфные металлические сплавы*. Москва, Металлургия.

3. Куницкий Ю.А., Борисов Ю.С., Коржик В.Н. (1989) *Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике*. Киев, Техника.

4. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Бурлаченко та ін. (2021) Композиційні порошки на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з добавками тугоплавких сполук для газотермічного нанесення покриттів *Автомат. зварювання*, **11**, 44–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.08>

5. ГОСТ Р 9.905-2007 (2007) *Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования*. Москва, Изд-во стандартов.

6. Жук Н.П. (2006) *Курс теории коррозии и защиты металлов*. Москва, ООО ТИД «Альянс».

7. Семенова И. В., Флорионович Г.М., Хорошилов А. В. (2002) *Коррозия и защита от коррозии*. Москва, ФИЗМАТЛИТ.

8. ГОСТ 23.208-79 (1981) *Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы*. Москва, Изд-во стандартов.

9. Григоренко Г.М., Борисова А.Л., Адеева А.И., Сладкова В.Н. (1995) Применение метода количественного рентгеноструктурного анализа при исследовании фазового состава газотермических покрытий. *Проблемы СЭМ*, **2**, 63–71.

10. ГОСТ 9.909-86. (1999) *Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические*. Москва, Изд-во стандартов.

11. Герц И. (1979) Пассивирование деформированного никеля в серной кислоте. *Защита металлов*, **15**, **1**, 29–33.

12. Тульский Г.Г. Артеменко В.М., Дерібо С.Г. (2019) *Теоретична електрохімія*. Харків, Харків. політехн. ін-т.

References

1. Suzuki, K., Fujimori, H., Hashimoto, K. (1987) *Amorphous metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

2. Lyuborskij, F.E. (1987) *Amorphous metal alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

3. Kunitskij, Yu.A., Borisov, Yu.S., Korzhik, V.N. (1989) *Noncrystalline metal materials and coatings in engineering*. Kiev, Tekhnika [in Russian].

4. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Burlachenko, O.M. (2021) Composite powders based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with additives of refractory compounds for thermal spraying of coatings. *The Paton Welding J.*, **11**, 44-53. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2021.11.07>

5. GOST R 9.905-2007 (2007) *Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosion test methods. General requirements*. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].

6. Zhuk, N.P. (2006) *Lectures on theory of corrosion and metal protection*. Moscow, Alyans.

7. Semenova, I.V., Florionovich, G.M., Khoroshilov, A.V. (2002) *Corrosion and protection from corrosion*. Moscow, Fizmatlit [in Russian].

8. GOST 23.208-79 (1981) *Ensuring of wear resistance of products. Wear resistance testing of materials by friction against loosely fixed abrasive particles*. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].

9. Grigorenko, G.M., Borisova, A.L., Adeeva, A.I., Sladkova, V.N. (1995) Application of method of quantitative X-ray structure analysis at investigation of phase composition of thermal coatings. *Problemy Spets. Elektromatellurgii*, **2**, 63–71 [in Russian].

10. GOST 9.909-86 (1999): *Metals, alloys, metal and nonmetal inorganic coatings*. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].

11. Gerts, I. (1979) Passivation of wrought nickel in sulfuric acid. *Zashchita Metallov*, **15**(1), 29–33 [in Russian].

12. Tul'skyi, G.G., Artemenko, V.M., Deribo, S.G. (2019) *Theoretical electrochemistry*. Kharkiv, KhPI [in Ukrainian].

PRODUCING AND PROPERTIES OF DETONATION COATINGS BASED ON FeMoNiCrB AMORPHIZING ALLOY WITH ADDITION OF STRENGTHENING PHASES

Yu.S. Borisov, A.L. Borisova, T.V. Tsimbalista, A.I. Kildiy, K.V. Yantsevich, Z.G. Ipatova

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The structure and properties of amorphizing composite detonation coatings based on FeMoNiCrB alloy were studied. FeMoNiCrB + ZrB₂, FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C, FeMoNiCrB + FeTiO₃ composite powders were used for coatings deposition, which were produced from a mixture of the composition powders by mechanical alloying. It is found that as a result of detonation spraying of all the powder compositions, the formed coatings have dense, lamellar multiphase structure. The coating composition includes Fe(Ni,Cr) solid solutions, Mo₃FeB₂ and Fe₃B borides, dispersed inclusions of alloying additives (ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃) and oxides (ZrO₂ and FeCr₂O₄ or Fe₂O₃, or Fe₃O₄), as well as an amorphous phase, the amount of which in the coating structure has increased, as a result of the detonation spraying process. The values of microhardness, corrosion resistance, fatigue life and wear resistance of the composite detonation coatings are given. 12 Ref., 6 Tabl., 4 Fig.

Keywords: *detonation spraying, composite powders, amorphizing iron alloy, zirconium boride, titanium-chromium carbide, iron titanate, coating, corrosion resistance, wear resistance*

Надійшла до редакції 12.10.2021



Düsseldorf, Germany

join the best: 09 - 13 May 2022

ПЕРЕПОЧНІТЬ СВІЙ БІЗНЕС

Підготовка до Wire and Tube 2022 йде повним ходом. 9 травня 2022 року Wire and Tube відкриє свої двері в Дюссельдорфі. Ці провідні світові торгові ярмарки є родзинкою для індустрії обробки дроту, кабелю і труб: платформа для прогресу, стартова площадка для бізнесу. Кожен, хто приймає рішення або експерт, має бути на найважливішому світовому шоу для цих галузей. Які останні розробки в техніці, технології, продуктах і процесах? Тут можуть зустрітися лідери світового ринку та початківці. Якими є поточні реакції в області цифровізації та розумного виробництва, від штучного інтелекту до робототехніки? Виставки дадуть відповіді на ці та багато інших запитань, які виникають на практиці.

ХІ МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах

12–16 вересня 2022 р., Одеса, готель «Аркадія»

Голова програмного комітету академік І.В. Кривцун



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



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

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

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей

до 19.08.2022 р.

Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі

до 05.09.2022 р.

Оплата реєстраційного внеску

до 12.09.2022 р.

Оргкомітет

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

CHEMICAL WELDING OF POLYURETHANES AND THEIR COMPOSITES

ХІМІЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІУРЕТАНІВ І КОМПОЗИТІВ НА ЇХ ОСНОВІ

A. Vashchuk¹, M. Iurzenko¹, M. Korab¹, E. Privalko²
А. Ващук¹, М. Юрженко¹, М. Кораб¹, Е. Привалко²

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

²O.O. Bogomolets National Medical University, 13, Shevchenko blvd., Kyiv, Ukraine, 01601

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

²Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця, 01601, м. Київ, бул. Шевченка, 13, Україна

Chemical welding as an attractive alternative to classical joining techniques occurs through the formation of new chemical bonds between neighboring molecules at the contacting surfaces to be joined. This review paper presents the current state of the chemical welding of polyurethanes and their composites via dynamic covalent bonds. The strength of welded joints obtained by different welding technologies was compared. Different processing parameters affecting the joint quality, namely welding time and welding temperature were summarized. The future perspectives of chemical welding of polyurethanes and their composites were discussed in the paper. 12 Ref., 7 Fig.

Хімічне зварювання як альтернатива класичним методам з'єднання базується на утворенні хімічних зв'язків між функціональними групами контактуючих поверхонь. У представленій оглядовій роботі проаналізовано сучасний стан хімічного зварювання поліуретанів завдяки наявності в їх структурі динамічних ковалентних зв'язків. Встановлено, що якість зварних з'єднань залежить від параметрів зварювання, пов'язаних із технологією зварювання. Основними параметрами, що визначають міцність зварних з'єднань, є температура зварювання та тривалість зварювання, тоді як контактні зусилля стиску при зварюванні лише незначним чином впливають на міцність. Міцність зварних з'єднань, як правило, зростає зі збільшенням температури або тривалості зварювання. Якість одержаних зварних з'єднань контролюється руйнівними та неруйнівними способами контролю. Важливо зазначити, що застосування хімічного зварювання не обмежується плівковими матеріалами і використовується також для зварювання деталей великих товщин. Встановлено, що хімічне зварювання застосовується і для композитів на основі поліуретанів, які привертають велику увагу завдяки своїм гібридним властивостям. Більш того, проведення хімічного зварювання композитів можливе з використанням світлового випромінювання, що пов'язано з присутністю світлочутливих наповнювачів, які каталізують хімічні реакції між функціональними групами на контактуючих поверхнях. Оскільки керування світлом відбувається дистанційно, локально та тимчасово, існує можливість проведення зварювання без впливу на навколишні ділянки матеріалу. У статті представлено порівняння міцності зварних з'єднань композитів, одержаних за різними технологіями зварювання. Встановлено, що утворення хімічних зв'язків між функціональними групами контактуючих поверхонь під дією випромінювання в ближній інфрачервоній області відбувається з вищою швидкістю і 1 хв достатньо для утворення якісного з'єднання. Бібліогр. 12, рис. 7

Keywords: polyurethanes, composites, chemical welding.

Ключові слова: поліуретани, композити, хімічне зварювання

Introduction.

Polymeric materials have been widely used in various fields of advanced technology, including transport, defense, civil industries due to low weight, specific stiffness, corrosion resistance, and high fatigue life. In advanced technologies, manufacturing large parts requires a complex mold, which consequently means a substantial increase in the cost. However, such a complex part can be manufactured through the assembling of small parts by using different joining techniques. Thus, there is a growing need for a fast and effective way of joining polymer structures.

Welding technology serving as an exceedingly good tactic to save materials and provide an excellent

bonding strength in the field of metal processing is also extensively applied in thermoplastic polymer materials. High-quality welding could be obtained when thermoplastic polymers are heated to their viscous flow state in the contact area. Thermosetting polymers are quite advantageous in comparison to thermoplastics since they have higher thermal stability, fixation ability, and can perform higher levels of mechanical work. Moreover, they cannot be replaced by thermoplastics in a wide range of engineering applications, especially those requiring high-performance such as the aircraft and automotive industry. However, due to the permanent molecular structure, thermosets could not melt or be dissolved once synthesized.

Alina Vashchuk – <http://orcid.org/0000-0002-4524-4311>, Maksym Iurzenko – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>, Mykola Korab – <http://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, Privalko Eleonora – <http://orcid.org/0000-0002-9893-5335>

© Alina Vashchuk, Maksym Iurzenko, Mykola Korab, Privalko Eleonora, 2021

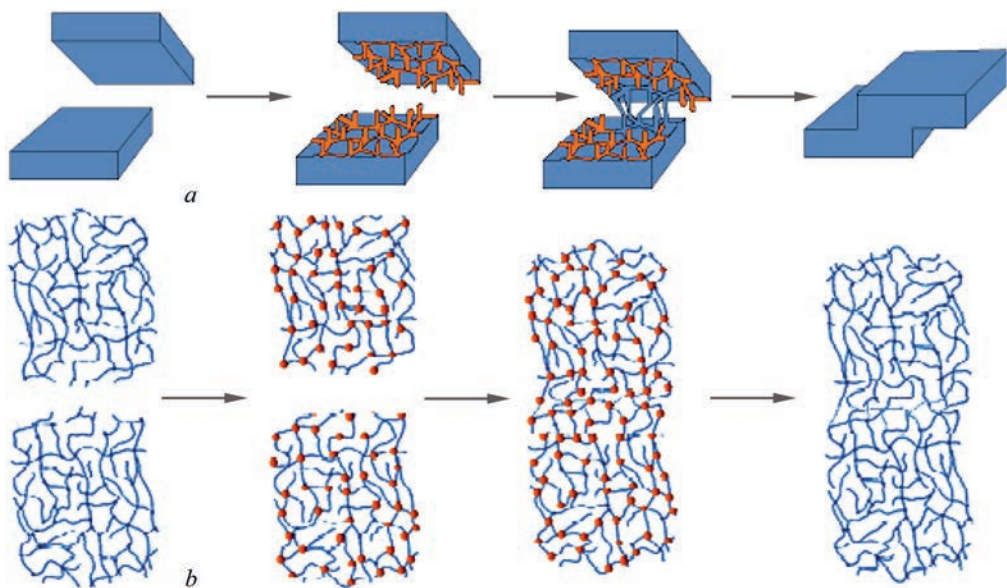


Fig. 1. Chemical welding of two surfaces involves chemical reactions (a). Topological rearrangements occur via exchange reactions on a macromolecular chain during chemical welding (b).

Рис. 1. Хімічне зварювання двох поверхонь внаслідок перебігу хімічних реакцій (a). Топологічні перетворення, які відбуваються внаслідок перебігу реакцій обміну на макромолекулярних ланцюгах під час хімічного зварювання (b).

As a consequence, the traditional diffusion welding technology cannot be simply applied to thermosets and their composites. Therefore, thermoset systems must rely on chemical welding only to join them.

Chemical welding refers to the process that occurred through the formation of new chemical bonds between neighboring molecules at the contacting polymer surfaces to be joined. In particular, vitrimers as a new class of polymers can rearrange their network topology via thermally triggered bond exchange reactions (BERs) at elevated temperatures without affecting the average crosslinking degree. Thus, when two separated vitrimer surfaces are brought into contact the reversible associations (bridges) are formed across the interface resulting in chemical welding (Fig.1). Polyurethanes represent a class of materials with important industrial applications that exhibit favorable mechanical, physical, and biocompatible properties [1 – 3]. Moreover, vitrimeric characteristics of polyurethanes have been already reported [4 – 5]. This review paper summarizes results on investigations of the current state of the chemical welding of polyurethanes and their composites.

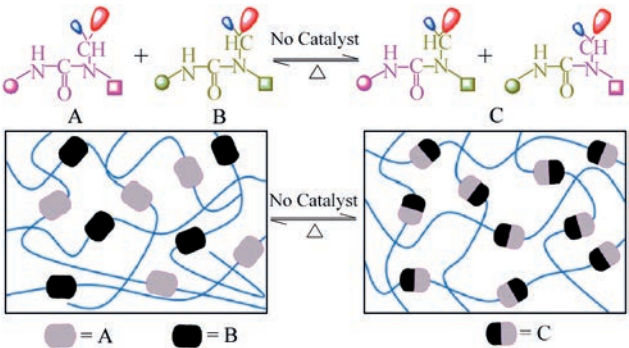


Fig. 2. Thermal-triggered mechanism of dynamic hindered urea bonds exchange [6].

Рис. 2. Механізм обміну карбамідними зв'язками [6].

Recent work on chemical welding.

Recently, to tackle the obstacle the vitrimer polyurethanes have been easily synthesized by using the designed secondary amine (through the addition reaction of aziridines and lauric acid) and isophorone diisocyanate in the absence of any catalyst [6]. The long strip of the sample with a width of 4 mm and thickness of 2 mm was cut in half with a razor blade and then the two pieces were put together at 25 °C for 3 min, followed by welding at 120 °C for 60 min without external stress. The thermal-triggered mechanism of chemical welding via dynamic hindered urea bonds exchange under catalyst-free conditions is shown in Fig. 2. It was found, that the welded joint can be stretched up to 200 % strain without tearing and can lift a weight of 0.5 kg without breaking at the welded part (Fig. 3).

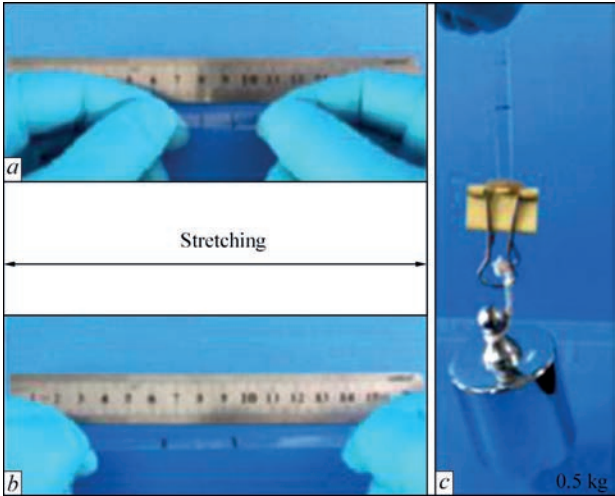


Fig. 3. Photograph of film welded at 120 °C for 60 min before (a) and after (b) stretching. Photograph of welded joint with a 0,5 kg weight lifting test (c) [6].

Рис. 3. Фотографії зварних з'єднань, одержаних за 120 °C протягом 60 хв до (a) та після розтягування (b). Фотографія випробування зварного з'єднання на підняття ваги в 0,5 кг (c) [6].

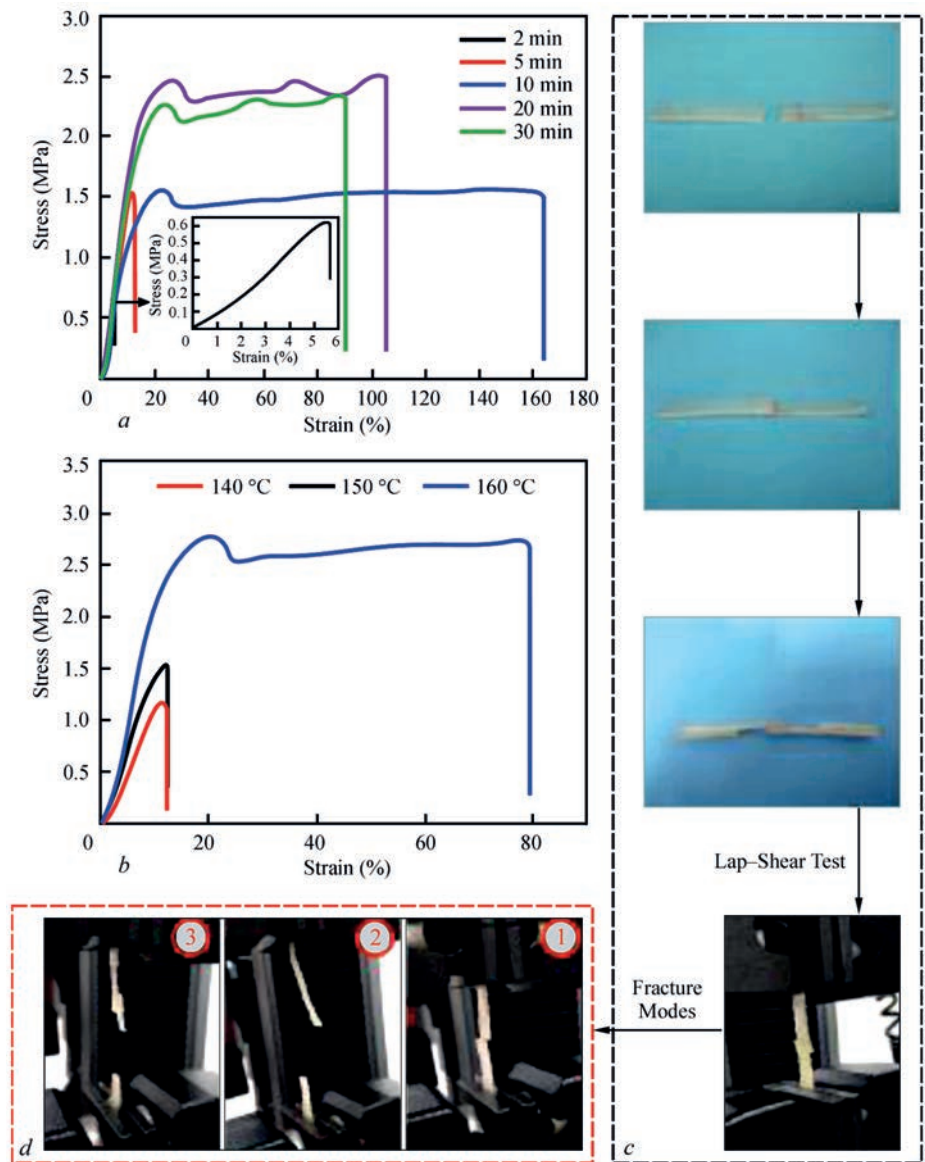


Fig. 4. The mechanical properties of the welded joint at 150 °C at different times (a) and different temperatures for 5 min (b). Specimen of the lap-shear test (c). Fracture modes of the welded joints (d) [7].

Рис. 4. Діаграма деформування зварних з'єднань, одержаних за 150 °C протягом різного часу зварювання (a) та за різних температур протягом 5 хв зварювання (b). Підготовка експериментальних зразків внакладку до випробування на зсув (c). Різні види руйнування зварних зразків (d) [7].

In recent years with increasing attention on the environment and economy, various low-cost and sustainable bio-based resources have been used as alternatives to petroleum-based materials. Fully biobased and recyclable polyurethane-vitrimers were designed via classical polyurethane chemistry: reaction of polyethylene glycol, castor oil, and hexamethylene diisocyanate, using dibutyltin dilaurate and ethyl acetate as catalyst and solvent, respectively [7]. The chemical welding through transcarbamoylation reaction of carbamate bonds was carried out (i) at 150 °C for different time (2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min) and (ii) at different temperature (140 °C, 150 °C, 160 °C) for 5 min by keeping the other parameters constant. This study showed that the stress of chemically welded joints tended to increase with welding time at a fixed temperature (Fig. 4a). It is worth noting that the welded joints with welding time of 2 min, 5 min (Fig. 4d^①), and 10 min (Fig. 4d^②) all broke at the overlapped part and had relatively lower stress at break. However, the welded joints under the same temperature but with a longer welding time (20 min and 30 min) had stress at break higher than 2 MPa and broke at bulk material instead of the overlapped part (Fig. 4d^③) due to nearly complete transcarbamoylation reaction at the overlapped part. Welding temperature also plays an important role in weld quality. It can be seen in Fig. 4b that higher welding temperature promoted better recovery of the material strength across the interface with the same welding time. Importantly, samples chemically welded at 140 °C (Fig. 4d^①) or 150 °C (Fig. 4d^②) were broken at the overlapped part and had relatively lower stress at the break, whereas the samples welded at 160 °C

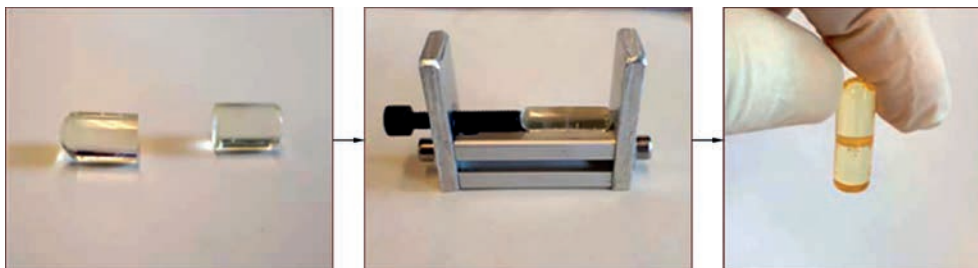


Fig. 5. Visual demonstration of chemical welding of poly(thiourethane) vitrimer films at 180 °C for 40 min under pressure [8].

Рис. 5. Демонстрація хімічного зварювання полі(тіоуретанової) вітримерної плівки за 180 °C під тиском протягом 40 хв [8].

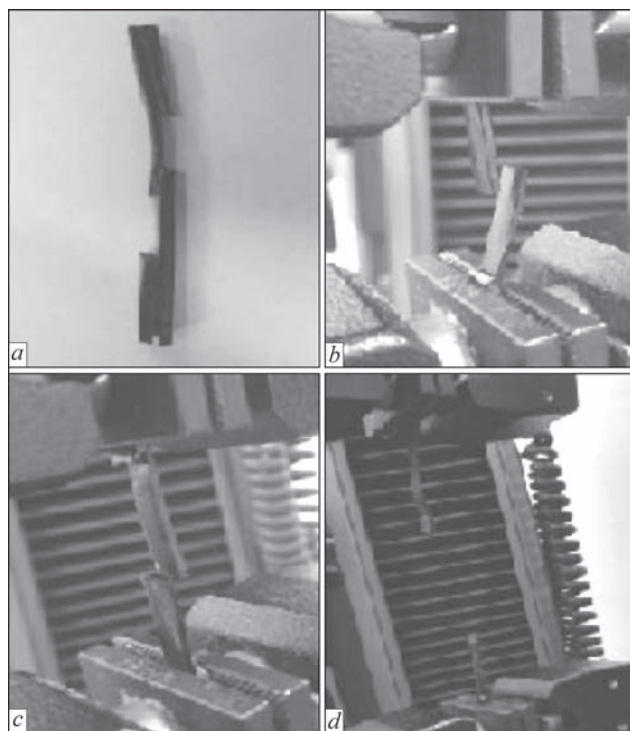


Fig. 6. The sample of the lap-shear test (a). The photographs of the lap-shear test from the samples with different weld times: 2 min (b), 5 min (c), and 20 min (d) [12].

Рис. 6. Зварне з'єднання для тесту на зсув внахлест (a). Фотографії випробування на зсув внахлест з'єднань, одержаних за різного часу зварювання: 2 хв (b), 5 хв (c), 20 хв (d) [12].

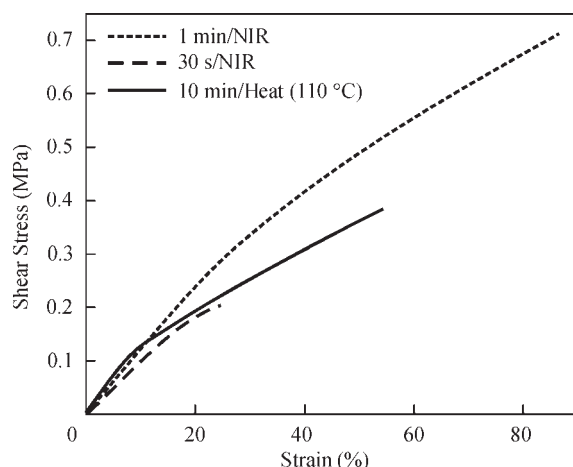


Fig. 7. Comparison of welding effects of CNTs-polyurethane vitrimer nanocomposite induced by NIR and heat [12].

Рис. 7. Діаграми деформування зварних з'єднань нанокмполімерів, одержаних під дією випромінювання в ближній інфрачервоній області та тепла [12].

were broken at bulk material part (Fig. 4d³). Thus, a facile strategy to select and optimize the processing conditions for chemical welding of films based on polyurethanes could be realized through changes in welding time and welding temperature.

The welding process is not limited to the film joints, and the thick samples can be chemically welded. Thus, a new type of vitrimers were prepared from commercially available monomers (trimethylolpropane tris(3-mercaptopropionate), hexamethylene diisocyanate) by an easy procedure using tert-butyl isocyanate and dibutyltin dilaurate as the catalysts [8]. The synthetic reaction has click characteristics, which assure a great homogeneity of the poly(thiourethane) network structure. These materials can be chemically welded at 180 °C for 40 min under pressure, as it is shown in Fig. 5. The trans-thiocarbamoylation reaction, which has a non-dissociative mechanism, responsible for the welding ability of these vitrimers has been chemically assessed by the use of model compounds and gas chromatography coupled to mass spectrometry. The non-dissociative character of the trans-thiocarbamoylation process has been confirmed in the materials by FTIR spectroscopy.

In the above studies, the heating stimulus was utilized to activate the chemical welding. However, direct heating is unsuited for a heat-sensitive application like biomedicine, and it is also limited when the targeted locations could not be reachable in some special engineering environments. In comparison with heating, the near-infrared (NIR) light-responsive method possesses many distinctive advantages including (i) remote activation is available due to the travel characteristics of light; (ii) regional activation can be realized by regulating the spot size without intervening with the surrounding environment; (iii) light stimulus is immediate by turning the light source on or off [9]. A common approach to creating light-responsive chemical welding is to introduce photothermal fillers, such as metal nanoparticles, conjugated polymers, rare earth organic complexes, carbon nanomaterials, photothermal fillers. Among them, carbon nanotubes (CNTs) as novel 1D nanomaterials have many excellent performances, namely high mechanical properties, electrical and thermal conductivity. Most important of all, CNTs can absorb NIR light and generate a large amount of heat [10 – 11]. Therefore, the addition of CNTs to polyurethane-vitrimers may be a good option to carry out chemical welding induced by NIR light.

Recently, CNTs-polyurethane vitrimer nanocomposites were synthesized by chemical reaction of the hexamethylene diisocyanate with polyethylene glycol ($M_n = 2000$) and castor oil in the presence of dibutyltin dilaurate as a catalyst for transcarbamoylation, with different content of CNTs ranging from 0 to 1 wt.% [12]. Chemical welding of the nanocomposites induced by NIR light (980 nm) was conducted with an overlap area of 1.0 mm×1.0 mm and irradiation by a NIR light at different times. The light intensity of the NIR laser irradiation was 1.41 W cm⁻². Although the shortest welding time was only 0.5 min, the shear strength has already reached 0.2 MPa, which was an amazing welding efficiency. As seen in Fig. 6b-d, the shear strengths of the welded joints gradually increased with the extension of welding time from 2 min to 20 min proving that longer welding time enhances the welding effect. Beyond that, the effect of CNTs content on the welding efficiency was discussed as well. It was found that the composite with 0.5 wt.% CNTs has a higher thermal conductivity than that with 0.05 and 0.1 wt.% CNTs under the same welding conditions, which promotes transcarbamoylation and endows the sample with excellent welding performance.

Recently, the chemical welding of the nanocomposites induced by heat and NIR light was discussed separately, and the welding efficiency of the two methods was compared (Fig. 7) [12]. It was found, that the two pieces of CNTs-polyurethane nanocomposites can never be chemically welded at 80 °C ($T_g = 90$ °C) due to the lack of adequate exchange reaction at this temperature. However, the specimens could be welded together at 110 °C for 10 min. It should be noted, that temperature of nanocomposites produced by the photothermal effect of CNTs has reached 90 °C 0.5 min or 110 °C at 1 min. It was surprising to find that the shear strength of the sample irradiated for 1 min by NIR was much stronger than that of the specimen heated at 110 °C for 10 min, which further proves that the NIR-welding technology possesses a higher efficiency. According to these results, chemical welding induced by NIR light would be beneficial for joining or repairing the CNTs-polyurethane nanocomposites.

Conclusions.

Chemical welding is a relatively new welding approach that opens the way towards assembly of polyurethane materials without adhesives or molds. Thus, polyurethanes can be facilely welded by heat. The weld quality could be controlled by different welding parameters associated with the welding procedure such as welding time and welding temperature. Chemical welding of polyurethane nanocomposites could be induced by heat and NIR-light. The NIR-induced welding technology is not only convenient but also environmentally friendly and has higher efficiency compared with thermal technology. Moreover, the

NIR-induced welding technology makes remote and spatial welding technology of nanocomposites possible. Although significant progress was made by researchers in the past years, their inputs are mostly based on observation of the weld with electron microscopic techniques and test data coming from mechanical tests. Work is left to be done to get high joining strengths with a reasonable welding time to enable the efficient transfer of new technologies to the industry in the close future.

Funding: This research was funded by the National Academy of Sciences of Ukraine under program No 6541230 for Young Scientist Laboratories (agreement No 11/01-2020).

References

1. Privalko, V.P., Privalko, E.G., Shtompel, V.I. et al. (1999) Influence of the structure of soft and stiff chain fragments on properties of segmented polyurethanes. I. Phase morphology. *Polymer Engineering & Science*, 39, 1534-1540 [in English].
2. Zdrahala, R.J., Zdrahala, I.J. (1999). Biomedical applications of polyurethanes: a review of past promises, present realities, and a vibrant future. *Journal of Biomaterials Applications*, 14, 67-90 [in English].
3. Georgoussis, G., Kyritsis, A., Pissis, P. et al. (1999) Dielectric studies of molecular mobility and microphase separation in segmented polyurethanes. *European Polymer Journal*, 35, pp. 2007-2017 [in English].
4. Yan, P., Zhao, W., Fu, X. et al. (2017) Multifunctional polyurethane-vitrimers completely based on transcarbamoylation of carbamates: thermally-induced dual-shape memory effect and self-welding. *RSC Advances*, 7, 26858-26866 [in English].
5. Zheng, N., Hou, J., Xu, Y. et al. (2017) Catalyst-free thermoset polyurethane with permanent shape reconfigurability and highly tunable triple-shape memory performance. *ACS Macro Letters*, 6, 326-330 [in English].
6. Jiang, L., Liu, Z., Lei, Y. et al. (2019) Sustainable thermosetting polyurea-vitrimers based on a catalyst-free process with reprocessability, permanent shape reconfiguration and self-healing performance. *ACS Applied Polymer Materials*, 1, 3261-3268 [in English].
7. Yan, P., Zhao, W., Fu, X. et al. (2017) Multifunctional polyurethane-vitrimers completely based on transcarbamoylation of carbamates: thermally-induced dual-shape memory effect and self-welding. *RSC Advances*, 7, 26858-26866 [in English].
8. Gamardella, F., Guerrero, F., De la Flor, S. et al. (2019) A new class of vitrimers based on aliphatic poly(thiourethane) networks with shape memory and permanent shape reconfiguration. *European Polymer Journal*, 122, 109361 [in English].
9. Habault, D., Zhang, H., Zhao, Y. (2013) Light-triggered self-healing and shape-memory polymers. *Chemical Society Reviews*, 42, 7244-7256 [in English].
10. Yang, Y., Pei, Z., Li, Z. et al. (2016) Making and remaking dynamic 3D structures by shining light on flat liquid crystalline vitrimer films without a mold. *Journal of the American Chemical Society*, 138, 2118-2121 [in English].
11. Mizuno, K., Ishii, J., Kishida, H. et al. (2009) A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 6044-6047 [in English].
12. Yan, P., Zhao, W., Wang, Y. et al. (2017) Carbon nanotubes-polyurethane vitrimer nanocomposites with the ability of surface welding controlled by heat and near-infrared light. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 218, 1700265 [in English].

Надійшла до редакції 05.10.2021

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ НА МЕХАНІЧНУ ПОВЕДІНКУ ТРУБ З ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ГУСТИНИ*

Ібрагім Рамадан, Марія Танасе,

Petroleum-Gas University of Ploiești, Romania

Дана публікація пропонує експериментальне дослідження, проведене із застосуванням технології зварювання нагрітим інструментом встик для пластикових труб для водопостачання, виготовлених з поліетилену високої густини (HDPE). Використовували відрізки водопровідних труб з PE 100 (SDR17, PN10) довжиною від 200 до 300 мм. Зварювання проводилося при різних параметрах зварювального процесу. Проаналізовано вплив параметрів зварювання на стійкість труб шляхом візуального обстеження та експериментальних випробувань, таких як: випробування на розтяг, вигин та стиск.

1. Вступ

Поліетилен (ПЕ) – один із найвідоміших та найбільш широко використовуваних полімерних матеріалів. Поліетилен високої густини (ПЕВГ, HDPE) широко використовується в якості сировини для виробництва водопровідних та газових труб. Основними перевагами використання труб з ПЕВГ є корозійна та хімічна стійкість, проста технологія монтажу, хороша зварюваність (навіть при температурі до -5°C), низька вартість монтажу та обслуговування, тривалий термін експлуатації – очікуваний термін служби становить до 100 років [1, 2].

На практиці, щоб побудувати трубопровідні мережі великої довжини, важливо з'єднати відрізки труби, використовуючи різні методи зварювання, зокрема, зварювання нагрітим інструментом встик (стикове зварювання), терморезисторне зварювання та екструзійне зварювання [3]. Внаслідок відносно низької вартості та простоти процедури, найбільш уживаним способом зварювання ПЕ труб є стикове зварювання [3].

Зварювання нагрітим інструментом встик передбачає одночасне нагрівання кінців двох труб/фітингів, що зварюються, доки на кожній контактній поверхні полімер не перейде у розплавлений стан.

Потім дві поверхні з'єднують з контрольованим тиском протягом певного часу охолодження та утворюється однорідне зварне з'єднання (стик). Отримане з'єднання повністю стійке до експлуатаційних навантажень і рівноцінне за міцністю до самої труби.

Нагрівна плита використовується для нагрівання кінців труби до температури, необхідної для плавлення.

Під час процесу зварювання утворюються внутрішні та зовнішні валики – «зварні ґрати». Існують оптимізовані технологічні карти зварювального процесу для мінімізації розміру зварних ґратів, однак, оскільки вони нічого не додають до загальної міцності зварного шва, їх можна безпеч-

но видалити, якщо потрібно. Знятий зварний ґрат можна використати для оцінки якості зварного з'єднання [4].

Якість зварного з'єднання оцінюється як за допомогою неруйнівного (візуальний огляд та геометричні розміри ґрату), так і руйнівного контролю (випробування на розтяг і вигин з'єднань).

2. Матеріали та методи

Для визначення впливу параметрів зварювального процесу на міцність зварного з'єднання поліетиленових труб було використано 5 м водопровідної труби PE 100 (SDR 17, PN10, $OD = 90$ мм). Труби було розрізано (рис. 1) і відторцьовано на кінцях, щоб зварювати труби, використовуючи різні параметри зварювання (рис 2).

Параметри зварювання вибирали, дотримуючись вказівок виробників пластмас [5]. Оскільки робоча машина не допускала зміни температури нагрівної



Рис. 1. Труби, що використовувалися для експериментального дослідження

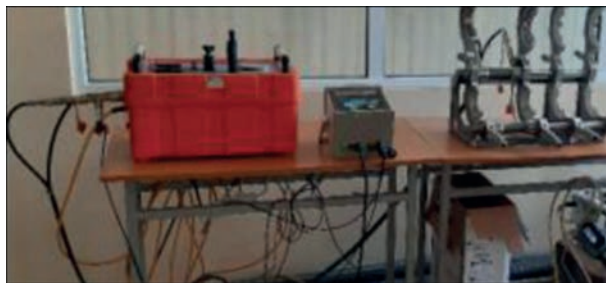


Рис. 2. Робочий пристрій для зварювання труб

* Опублікована в журналі «Полімерні труби» №1, 2021 р. Друкується з дозволу редакції.

Таблиця 1. Параметри зварювального процесу при випробуванні зразків

Зразок	Температура нагрівної плити t [°C]	Час прогріву торців труб τ [с]	Тиск охолодження P [бар]	Умови охолодження
45	220	45	15	Повільне охолодження на повітрі
60		60		Повільне охолодження на повітрі
60R		60		Швидке охолодження в льоді
90		90		Повільне охолодження на повітрі

плити (220 °C), варіативною складовою дослідження зварювання було обрано час (45, 60 та 90 с).

Додатково було проведено дослідження для холодної ПЕВГ труби. Два зразки швидко охолоджувались льодом і потім зберігалися в холодильній камері при температурі –15 °C протягом приблизно 20 днів (табл. 1, зразок 60 R).

Було зроблено по двоє зразків кожного виду (зварених в однакових умовах): один для розтягування, згинання та візуального обстеження і один для тестів на тиск (рис. 3).

Для перевірки якості зварних з’єднань технічний припис РТ CR 9-2013 «Затвердження процедур зварювання сталі, алюмінію, алюмінієвих сплавів та поліетилену високої густини (ПЕВД)» рекомендує візуальний огляд і випробування на розтяг. У рамках експериментальної програми для кращої оцінки якості зварних з’єднань була проведена серія додаткових випробувань (випробування на вигин та випробування на тиск).



Рис. 3. Зварні з’єднання, що використовувалися для візуального огляду

3. Результати та обговорення

А. Візуальний огляд

У літературі рекомендується кілька критеріїв прийняття або відхилення зварного шва при візуальному огляді [5, 6]. Розглянемо основні неприпустимі дефекти, пов’язані з невідповідністю або з порушеннями при зварюванні.

Неспіввісність труб є головним фактором, що призводить до серйозних дефектів зварювання. Хоча труби розташовуються співвісно, у тому числі в польових умовах, за допомогою затискачів центратора, існує можливість незначно підкорегувати співвісність та овальність. Також, особливо у випадку стикового зварювання труб з довгомірних бухт (до 200 м) після зняття затискачів центратора труби, як правило, відновлюють свою овальну форму, що призводить до появи дефектів зварювання. Особлива увага приділяється нерівномірності зварного шва навколо труби та різних висоті валиків зварного шва.

Надмірне зусилля при зварюванні, перегрів та інші аспекти, які залежать виключно від оператора або роботи обладнання також призводять до неправильного формування зварних швів (рис. 4).

При візуальному огляді виявлено недоліки, пов’язані з неспіввісністю труб і надмірним зусиллям при формуванні грату (рис. 5).

Первинний візуальний огляд є недостатнім, оскільки для оцінки потрібні додаткові критерії якості зварних швів.

Для подальшої оцінки якості зварних з’єднань було використано спосіб, розроблений Інститутом пластикових труб (Plastic Pipe Institute, PPI). Та-



Рис. 4. Відповідні/невідповідні з’єднання ПЕВГ труб [6]

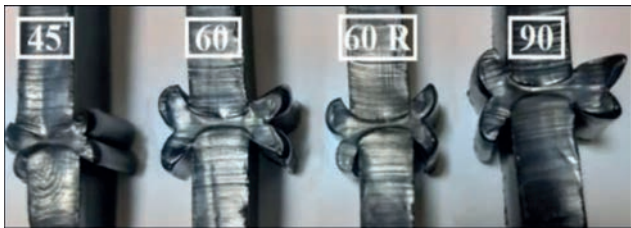


Рис. 5. Вигляд зварних з’єднань, отриманих в експериментах

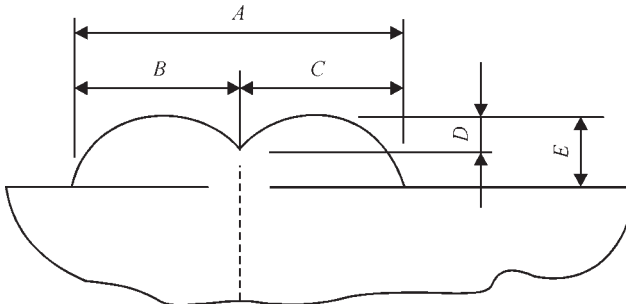


Рис. 6. Пропонований метод вимірювання геометричних параметрів зварного шва.

кож було виміряно геометричні параметри зварних швів, використовуючи позначення на рис. 6.

Вимірювання геометричних характеристик зварних швів показує значні відхилення від параметрів оптимального зварного шва (табл. 2).

В. Випробування на розтяг

Випробування на розтяг проводили відповідно до ISO 527:2012 «Пластмаси. Визначен-

Таблиця 2. Геометричні параметри зварних з’єднань

Зразок	A	B	C	D	E
	мм				
45	5,2	2,64	2,61	1,13	2,74
60	7,87	3,80	4,07	1,98	3,96
60R	6,31	2,15	3,25	1,86	3,78
90	8,88	4,18	4,69	2,12	4,28
Коректно проведене зварювання*	8	4	4	2	4

*Згідно з даними Інституту пластикових труб.

ня властивостей на розтяг» [7]. З кожної звареної труби брали по два зразки та визначали механічні характеристики за допомогою машини Lloyd-LRX plus (рис. 7).

Різні параметри зварювання визначають різні механічні характеристики кожного зварного з’єднання. Також варто відзначити підвищену крихкість зварного з’єднання, підданого прискореному охолодженню, тому рекомендується враховувати цей важливий аспект при практичній роботі, щоб мінімізувати можливі дефекти, які можуть виникнути після зварювання (табл. 3).

С. Випробування на згин

Випробування проводили відповідно до ISO 178: 2019 «Пластмаси. Випробування властивостей на згин» [8]. Було обрано 3-х точковий метод випробування на згин, при якому зразок ви-

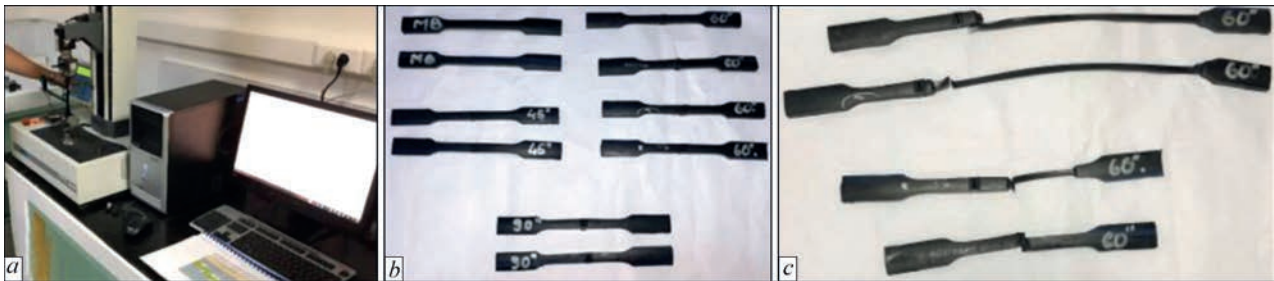


Рис. 7. Визначення механічних властивостей випробуванням на розтяг: а – експериментальна установка для випробувань на розтяг; б – вигляд зразків перед випробуванням на розтяг; с – порівняння вигляду деяких зразків після проведення випробування на розтяг

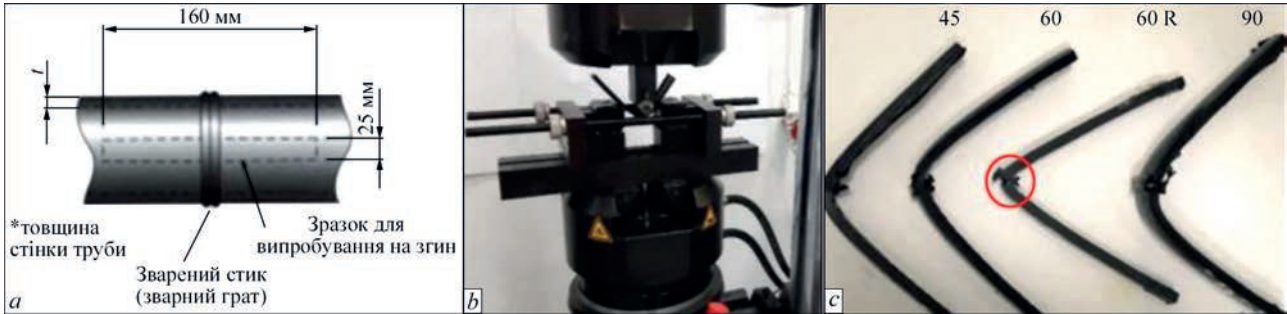


Рис. 8. Випробування на згин: а – схема підготовки зразків до випробування; б – процес випробування зразків; с – результати випробувань зразків

Таблиця 3. Результати тесту на розтяг

Зразок	L_f , мм	L_f , мм	A , %	R_m , МПа	Зразок	L_f , мм	L_f , мм	A , %	R_m , МПа
45a	370	80	362,5	32,50	60R a	200	80	150	17,87
45b	364	80	355	32,78	60R b	207	80	158,75	18,14
60a	378	80	372,5	31,62	90 a	312	80	290	26,75
60b	354	80	342,5	33,04	90 b	320	80	300	26,02



Рис. 9. Гідравлічні випробування: а – зразок труби із заглушками для гідравлічних випробувань; б – покази тиску на манометрі

різається із звареної труби так, щоб зварний шов розміщувався посередині (рис. 8, а та б).

Випробування на згин зразків (60 R, рис. 8, с) виявляє такі аспекти:

- у труб, зварні з'єднання яких швидко охолоджувалися, зварювальний шов був жорстким, що призвело до крихкого руйнування, це підтверджує висновки, зроблені в результаті випробувань на розтяг;

- у всіх інших з'єднаннях (при повільному охолодженні) спостерігалася пластична поведінка шва, що згинався без розриву під кутами, значення яких перевищували мінімальні значення, допустимі в стандарті для відповідного тесту.

Д. Гідравлічні випробування

Для цього дослідження було використано експериментальний вузол, що складається з компресора, насоса, робочої труби та ущільнювальних ковпачків. Тиск реєстрували за допомогою манометра (рис. 9).

Результати гідравлічних випробувань показують, що зразки 45'', 60'', 90'' проходять тест, витримуючи тиск 40 бар (рис. 9, б) без втрат тиску, що дозволяє визнати результат зварювання задовільним, незважаючи на недоліки, виявлені під час візуального огляду. Зразок 60 R був єдиним, що не пройшов випробування, хоча візуальний огляд не вказував на проблеми.

4. Висновки

Після проведення тестів можна зробити такі висновки:

- труби, зварні з'єднання яких швидко охолоджувалися, стали крихкими, зварний шов жорстким, що призвело до його руйнування, це підтверджується висновками, зробленими з випробування на розтяг;

- у всіх інших з'єднаннях (при повільному охолодженні) спостерігалася пластична поведінка

шва, що згинався без розриву під кутами, значення яких перевищували мінімальні значення, допустимі в стандарті для відповідного тесту;

- якщо роботи проводяться в умовах, які можуть призвести до прискореного охолодження зварних швів, необхідно вживати додаткові заходи для запобігання проблем, які можуть виникнути в таких випадках;

- під час зварювання рекомендується забезпечувати співвісне положення труб та дотримуватися рекомендованого часу прогріву торців труб для отримання зварних з'єднань належної якості;

- результати, отримані при випробуваннях на розтяг для зразків, що мали завищений час зварювання, піднімають деякі питання, тому в цьому напрямку будуть проводитися подальші дослідження.

Література/References

1. Alanaaf A., Mohamed D. *The Effect of Thickness and Temperature on the Burst Pressure of HDPE Pipes*. – Materials Science, 2017.
2. Popescu M., Argesanu V., Jula M. Problems Associated with PEHD Welding, *Mater. Plast.* 43(4), 2006, p. 324-329.
3. Pokharel P., Yoonsang K., Sunwoong C. Microstructure and Mechanical Properties of the Butt Joint in High Density Polyethylene Pipe. – *International Journal of Polymer Science*, 2016.
4. <https://www.pe100plus.com/PE-Pipes/Technical-guidance/model/Construction/methods/What-is-butt-fusion-hdpe-welding-i290.html>
5. Technical Letter Report Preliminary Assessment of NDE Methods on Inspection of HDPE Butt Fusion Piping Joints for Lack of Fusion JCN N6398, Task 2D S. L. Crawford S. E. Cumblidge S. R. Doctor T. E. Hall M. T. Anderson. – May, 2008. – Prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission under U.S. Department of Energy Contract DE-AC05-76RL01830.
6. UPONOR TECHNICAL BULLETIN. – Butt Fusion, *Joining Procedure and Qualification Guide*, Canada, 2016.
7. ISO 527: 2012 – *Plastics. Determination of tensile properties*.
8. ISO 178:2019 – *Plastics. Determination of flexural properties*.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF WELDING PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL BEHAVIOUR OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE PIPES

Ibrahim Ramadan, Maria Tanase

Petroleum-Gas University of Ploiești, Romania

This publication offers an experimental study carried out with the use of heated tool technology for welding plastic pipes for water supply manufactured of a high-density polyethylene (HDPE). The sections of water pipes from PE 100 (SDR17, PN10) with a length from 200 to 300 mm were used. Welding was carried out at different parameters of the welding process. The influence of welding parameters on the stability of pipes by visual examination and experimental tests, such as: tensile, bend and compression tests, was analyzed.

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

III МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

12–16 вересня 2022

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Контрольні дати

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

ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

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

VI Міжнародна конференція

ТИТАН 2022: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

30 травня – 1 червня 2022 р.

Голова програмного комітету
академік С.В. Ахонін



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Національний університет «Запорізька політехніка»
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



Тематика конференції

- Технології та обладнання для отримання губки, злитків та відливок з титану та його сплавів
- Адитивні технології в виробництві виробів з титанових сплавів
- Деформаційна обробка титану
- Виробництво та використання порошків титану
- Структура та властивості титанових сплавів
- Нові сплави на основі титану та інтерметалідів титану
- Інженерія поверхні титанових сплавів
- Технології зварювання та пайки титанових сплавів
- Застосування виробів та конструкцій з титану та сплавів на його основі в промисловості

Контрольні дати

Надання заявок на участь в конференції та тез доповідей до 12.05.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі до 19.05.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску до 30.05.2022 р.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
вул. Казимира Малевича, 11,
м. Київ, 03150, Україна
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/ukr/titan2022

Інформаційна підтримка:
«Сучасна електрометалургія»
«Автоматичне зварювання»
«Biuletyn Instytutu Spawalnictwa»



Welding in the World

Volume 65, issues 11–12, 2021

<https://link.springer.com/journal/40194/volumes-and-issues/>

November 2021, issue 11

Електронно-променеве зварювання прямокутного мідного дроту в електроприводах. *Tamás Tóth, Jonas Hensel, Klaus Dilger*

Вплив характеристик дуги TIG на морфологію та структуру зварного шва феритної нержавіючої сталі AISI444 при імпульсному струмі. *Zhihai Dong, Yiwen Li, Yunlong Chang*

Форма ванни розплаву, що створюється гаусовим джерелом тепла, що рухається. *Umberto Prisco*

Оцінка втоми адитивно виготовлених конструкцій із AlSi10Mg з використанням концепцій ефективних напруг. *Kai Schnabel, Jörg Baumgartner, Matilde Scurria*

Чисельне дослідження впливу недостатньої та надмірної обробки на залишковий напружений стан, викликане високочастотним механічним проковуванням. *Yuki Banno, Koji Kinoshita, Zuheir Barsout*

Виявлення тріщини у зварному стику пофарбованої фасонки фланця за допомогою ультразвукового контролю. *Hiromi Shirahata, Shigeyuki Hirayama, Yuto Yamase*

Застосування високочастотної обробки механічним впливом підвищення втомної міцності корозійностійких зварних з'єднань. *J. Weinert, S. Gkatzogiannis, T. Ummerhofer*

Чисельне дослідження впливу залишкових напруг на коефіцієнт інтенсивності напруг та втомну довговічність для таврового стикового зварного з'єднання з тріщинами на поверхні. *Phyo Myat Kyaw, Naoki Osawa, Ramy Gadallah*

Вплив невидимих поверхневих забруднень на якість ультразвукового зварювання. *Jeff L. Ellis, Miranda Marcus, Matt Nitsch*

Дифузійне зварювання сплаву із середньою ентропією CoCrNi (MEA) та нержавіючою сталлю SUS 304 при різних температурах з'єднання. *Muhammad Samiuddin, Jinglong Li, Jiangtao Xiong*

Вібраційне паяння тертям з перемішуванням (FSVB): покращена версія паяння тертям з перемішуванням. *Mahmoud Abbasi, Behrouz Bagheri, Amin Abdollahzadeh*

Вплив температури паяння на міжфазну мікроструктуру та механічні властивості з'єднання GH3039, виконаного з присадним металом Ni – P. *Yuzhao Lv, Ke Han, Ting Wang*

Розробка нового припою Ti-Zr-Cu-Ni-Ag для пайки титанових сплавів. *Yongjuan Jing, Haibo Yang, Huaping Xiong*

Дослідження дифузійної поведінки елементів з'єднань 316 L/BNi-2 під час паяння у вакуумній печі на основі моделі Больцмана-Матано. *Han-Yang Ma, Ze-Pan Liu, Shan-Tung Tu*

December 2021, issue 12

Прогнозування геометрії валика з урахуванням впливу температури між шарами при адитивній дротяно-дуговій технології на основі CMT. *Zeya Wang, Sandra Zimmer-Chevret, Gabriel Abba*

Аналіз розширеної форми хвилі та варіантів керованого короткого замикання MIG/MAG. *Régis Henrique Gonçalves e Silva, Daniel Galeazzi, Rafael Albino Bernardi*

Регулювання залишкової напруги в зварних з'єднаннях сталі AISI 304 з ніобієм, отриманих лазерним зварюванням з використанням прошарку з міді. *Mingxiao Shi, Jiugong Chen, Haochun Xia*

Визначення чутливості окрихчування оцінкованих сталей на основі випробування на розтріскування по програмованій деформації. *M. Meyerdierks, M. Zinke, E. Biro*

Вплив зварювального струму на мікроструктуру та механічні властивості GTAW–з'єднань сплаву ZLa22. *Weiyang Zhou, Qichi Le, Xuqiang Huang*

Новий зварювальний порошковий дріт для нержавіючої сталі 316L зі зниженим викидом диму Cr (VI): частина 1 – аспекти здоров'я, пов'язані зі складом частинок та виділенням металів. *Elin M. Westin, S. McCarrick, Y. S. Hedberg*

Еволюція мікроструктури дуплексної нержавіючої сталі 2507, обробленої тертям з перемішуванням

Shikang Gao, Hongyun Zhao, Yunqiang Zhao

Поведінка при відмові та механічні властивості при контактному точковому зварюванні загартованих та розділених (Q&P) сталей. *Bruna Figueredo, Dileep Chandran Ramachandran, Elliot Biro*

Вплив ультразвукової вібрації на мікроструктуру та еволюцію текстури магнієвого сплаву AZ91 при зварюванні тертям з перемішуванням. *F. Baradarani, S. Emami, F. Khan MD*

Дослідження характеристик ультразвукового склеювання напівтвердого сплаву Al6061. *Hao Li, Qi Zhang, Zhenglong Liang*

Сценарії зварювального впливу. *V. van der Mee*

Вплив пульсації струму на параметри затвердіння при мікроплазмовому дуговому зварюванні тонколистового сплаву 718. *A. K. Sahu, S. Bag*

Чисельне моделювання динамічної поведінки зварювальної ванни при зварюванні TIG із зазором. *Xiaofei Wang, Min Lu, Jinqiang Gao*

Відновлення поверхні зварювальної ванни при стаціонарному зварюванні TIG з дротом. *Jian Kang Huang, Guangyin Liu, Ding Fan*



**Міжгалузовий учбово-атестаційний центр
Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України**



Програми професійної підготовки на 2022 р.

Шифр курсу	Найменування програми		Тривалість	Строки проведення	
1. Підвищення кваліфікації інженерно-технічних працівників					
101	Підтвердження професійної компетентності координаторів (керівників) зварювальних робіт згідно ДСТУ ISO 14731 «Координація зварювальних робіт. Завдання і функції»		сертифікація	3 тижня (112 г)	березень, жовтень
102			ресертифікація	24 г	травень, липень, листопад
103	Розширення області сертифікації координаторів (керівників) зварювальних робіт		6 г	жовтень	
106	Технічне керівництво зварювальними роботами при ремонті діючих трубопроводів (під тиском)		підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	за узгодженням з замовником
107			переатестація	22 г	
109	Технічне керівництво роботами по контактному стиковому зварюванню залізничних рейок.		72 г	лютий-грудень	
111	Підготовка і атестація голів комісій з атестації зварників - експертів Українського атестаційного комітету зварників (УАКЗ)		3 тижня (112 г)	квітень, грудень	
112	Розширення області атестації голів комісій з атестації зварників – експертів УАКЗ (згідно НПАОП 0.00-1.16-96)		8 г	травень, грудень	
1121	Розширення повноважень експертів УАКЗ на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г	червень	
1122	Розширення повноважень експертів УАКЗ на право атестації зварників пластмас згідно ДСТУ EN 13067		72 г	травень	
113		фахівців технологічних служб, відповідальних за організацію атестації зварників	2 тижня (72 г)	по мірі комплектування груп	
114	Підготовка і атестація членів комісій по атестації зварників:	фахівців служб технічного контролю, відповідальних за контроль зварних з'єднань (включаючи спеціальну підготовку до атестації по візуально-оптичному методу контролю)	2 тижня (74 г)		
115		фахівців служб охорони праці підприємств	2 тижня (74 г)		
116	Розширення області атестації членів комісій по атестації зварників – фахівців технологічних служб по зварюванню (згідно НПАОП 0.00-1.16-96)		6 г	травень	
117	Розширення повноважень членів комісій по атестації зварників – фахівців технологічних служб по зварюванню на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г	по мірі комплектування груп	
118	Розширення повноважень членів комісій по атестації зварників – фахівців з технічного контролю на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		24 г		
119	Підтвердження повноважень (переатестація) голів комісій з атестації зварників - експертів УАКЗ з розширенням повноважень на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г	січень, березень, травень, жовтень, листопад	
120	Підтвердження повноважень (переатестація) членів комісій по атестації зварників:	фахівців технологічних служб по зварюванню з розширенням повноважень на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1	32 г	січень, березень, травень, жовтень	
121		фахівців з технічного контролю	16 г	лютий, травень, липень, жовтень	
122		фахівців з технічного контролю (включаючи спец. підготовку до атестації по візуально-оптичному методу контролю)	36 г		
123		фахівців з охорони праці	16 г		
130	Перепідготовка фахівців зварювального виробництва по програмах Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) із присвоєнням кваліфікації:	Міжнародний інженер із зварювання	453/ 128 г ¹	квітень, листопад	
132		Міжнародний технолог із зварювання	372/91 г ¹		
134		Міжнародний спеціаліст із зварювання	248/60 г ¹		
135		Міжнародний практик із зварювання	114 г		
136		Міжнародний дизайнер (конструктор) із зварювання	40 г	за узгодженням з МІЗ	
137		Міжнародний інспектор із зварювання	повного рівня	230 г	вересень
140			стандартного рівня	170 г	
139			базового рівня	115 г	
149			фахівців, які мають кваліфікацію «Міжнародний інженер / технолог із зварювання»	76/78 г	
141	Металографічні дослідження металів і зварних з'єднань		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	липень
142			переатестація	22 г	квітень, липень, вересень
143	Фізико-механічні випробування матеріалів і зварних з'єднань		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (72 г)	по мірі комплектування груп
144			переатестація	20 г	
145	Емісійний спектральний аналіз (стилоскопіювання) металів і сплавів		спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (74 г)	
146			переатестація	22 г	
151	Виробництво зварювальних матеріалів: організація, технології і системи управління якістю		2 тижня (72 г)	за узгодженням з замовником	

Тематичні семінари (можливе проведення на території замовника)			
161	Нормативно-технічна документація у зварювальному виробництві, стан і перспективи	2 дні (16 г)	березень, червень, жовтень
162	Забезпечення якості зварювання. Вимоги національних і міжнародних стандартів	2 дні (16 г)	квітень, червень, жовтень
163	Виготовлення конструкцій із сталі згідно вимог ДСТУ EN 1090	32 г	лютий

2. Підвищення кваліфікації педагогічних працівників системи професійної освіти в галузі зварювання

203	Підвищення кваліфікації майстрів (інструкторів) виробничого навчання із зварювання	110 г	за узгодженням з замовником
204	Підвищення кваліфікації викладачів спеціальних дисциплін професійно-технічних навчальних закладів по напрямку «Зварювання»	40 г	

3. Професійна підготовка, перепідготовка і підвищення кваліфікації кваліфікованих робітників в галузі зварювання і споріднених технологій
(з присвоєнням кваліфікації відповідно до національної і міжнародної кваліфікаційних систем)

Курсова підготовка ЗВАРНИКІВ:

301	ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	9 тижнів (356 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
302	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	5 тижнів (192 г)	
304	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	7 тижнів (276 г)	
306	автоматичного дугового зварювання під флюсом / в захисних газах	3 тижня (112 г)	
308	контактного (пресового) зварювання рейок з атестацією відповідно ДСТУ EN 14732	3 тижня (112 г)	
309	пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) з атестацією відповідно до ДСТУ EN 13067	5 тижнів (196 г)	

Підготовка зварників по програмах Міжнародного інституту зварювання із присвоєнням кваліфікації:

310	Міжнародний зварник кутових швів (IFW) з атестацією по EN ISO 9606-1	130 – 210 г ²	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
312	Міжнародний зварник плоских з'єднань (IPW) з атестацією по EN ISO 9606-1	250 – 380 г ²	
315	Міжнародний зварник труб (ITW) з атестацією по EN ISO 9606-1	360 - 510 г ²	
318	Міжнародний практик-зварник (IWP) з атестацією по EN ISO 9606-1	35 - 153 г ²	

Перепідготовка ЗВАРНИКІВ із присвоєнням кваліфікації «Міжнародний зварник»: (IFW, IPW, ITW)

321	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 ²	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
322	перепідготовка зварників механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г ²	
323	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г ²	

Підвищення кваліфікації ЗВАРНИКІВ:

330	ручного дугового зварювання покритими електродами	2 тижня (72 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
331	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах	2 тижня (72 г)	
333	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG)	2 тижня (72 г)	
334	механізованого дугового зварювання порошковим дротом	2 тижня (72 г)	

Курсова підготовка контролерів неруйнівного контролю:

343	Спеціалізація – візуально-оптичний контроль	72/196 г ³	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
344	Спеціалізація – радіографічний контроль	72/196 г ³	
345	Спеціалізація – ультразвуковий контроль	72/196 г ³	
346	Спеціалізація – магнітопорошковий контроль	72/196 г ³	
347	Спеціалізація – капілярний контроль	72/196 г ³	

4. Атестація персоналу зварювального виробництва

400	Атестація координаторів (керівників) зварювальних робіт відповідно до ДСТУ ISO 14731	8 г	проводиться по закінченні курсів 101-109
401	Спеціальна підготовка і атестація зварників відповідно до НПАОП 0.00-1.16-96 і стандартів ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732	72 г	постійно
402	Додаткова і позачергова атестація зварників згідно з НПАОП 0.00-1.16-96	24 г	
403	Періодична атестація зварників відповідно до НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5	32 г	
405	Спеціальна підготовка і атестація зварників авіаційної промисловості відповідно до ДСТУ ISO 24394	72 г	

406	Періодична атестація зварників відповідно до міжнародного (європейського) стандарту EN ISO 9606-1	24 г	постійно
407	Спеціальна підготовка і атестація операторів автоматичного зварювання плавленням відповідно до стандарту ДСТУ ISO 14732	72 г	
411	Спеціальна підготовка і атестація зварників на допуск до виконання зварювальних робіт при ремонті діючих магістральних трубопроводів (під тиском)	3 тижня (112 г)	за узгодженням з замовником
412	Періодична атестація зварників на допуск до виконання зварювальних робіт при ремонті діючих магістральних трубопроводів (під тиском)	32 г	
413	Періодична атестація операторів-зварників контактної-стиківого зварювання рейок відповідно до ДСТУ ISO 14732 і СОУ 35.2-00017584-030-1:2009 (проводиться по закінченню курсу 308)	32 г	
414	Атестація зварників пластмас відповідно до ДСТУ EN 13067 (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб)		проводиться по закінченні курсу 309
415	Періодична атестація зварників пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) відповідно до ДСТУ EN 13067	32 г	щокварталу
421	Спеціальна підготовка дефектоскопістів до сертифікації згідно ДСТУ EN 9712	ультразвуковий контроль	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
423		32/36 / 64 (I рів) г ⁴	
427		40/48 / 72/80 /144 (II рів) г ⁴	
430		радіографічний контроль	
433		36/40 72 (I рів) г ⁴	
436		40/48 / 76/80 / 152 (II рів) г ⁴	
		16/20 / 30 (I рів) г ⁴	
		20/24 / 35/40 / 70 (II рів) г ⁴	
448	Переатестація операторів-зварників контактної-стиківого зварювання рейок відповідно до вимог ДСТУ ISO 14732 і СОУ 35.2-00017584-030-1:2009	32 г	лютий

5. Тренінги, тестування і підтвердження кваліфікації

501	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG)	4 – 12 г ⁵	за узгодженням з замовником
502	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG)	4 – 12 г ⁵	
503	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників ручного дугового зварювання покритими електродами (MMA)	4 – 16 г ⁵	
512	Практичні тренінги з різних способів зварювання	8 – 32 г ⁵	

- 1 -

Тривалість навчання визначається залежно від базової професійної підготовки і досвіду роботи у зварювальному виробництві.
- 2 -

Тривалість навчання залежить від спеціалізації.
- 3 -

Тривалість програми визначається за результатами вхідного тестування.
- 4 -

Тривалість навчання вказується в направленні ОСП (орган по сертифікації персоналу).
- 5 -

Тривалість програми залежить від умов і характеру випробувань.

•

За узгодженням із Замовниками можливе проведення навчання по інших програмах, що не ввійшли в даний перелік.

•

На період навчання слухачам надається житло з оплатою за готівку.

•

Вартість навчання визначається при укладанні договору.

•

Для прийому на навчання необхідно направити заявку із зазначенням шифру курсу, кількості фахівців і поштових реквізитів підприємства.
- Україна, 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 56 Тел. (044) 294-61-65; 294-61-67, 200-82-80, 200-81-09,
E-mail: paton_muac@ukr.net, <http://muac.kpi.ua>
- ЖУРНАЛИ для професіоналів
-
- Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031
-
- Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/lpwj
Передплатний індекс 21791
-
- Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475
-
- Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693
- ISSN 0005-111X АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, №12, 2021
- 59

РОЗВИТОК ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТМАС В ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

22 січня 1979 р. міністр хімічної промисловості СРСР Л.А. Костандов і Президент академії наук УРСР Б.Є. Патон підписали спільний наказ № 62/42 щодо створення в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) Міжгалузевого центру зі зварювання пластмас. Згідно з наказом ІЕЗ від 26 лютого 1979 р. № 48-к з 1 березня 1979 р. в Інституті був створений науково-технологічний відділ № 80 «Зварювання пластмас» і виділена група конструкторів для розробки обладнання для зварювання пластмас, згодом – відділ № 218 ОКТБ ІЕЗ. Також згідно з цим наказом завідувачем від. № 80 був призначений к.т.н. Г.М. Кораб, а ще 5 співробітників були переведені з різних відділів ІЕЗ.

Тоді новий відділ розпочав роботу з однієї кімнати, яка знаходилась у корпусі № 3, загальною площею близько 17 м². Однак у пункті 6 спільного наказу № 62/42 було наведено формулювання про те, що Міністерство хімічної промисловості СРСР виділить фінансування для спорудження в ІЕЗ лабораторного корпусу площею до 8000 м². Директор Інституту академік Б.Є. Патон прийняв рішення про те, що в лабораторному корпусі, крім від. № 80 повинен розміститися і від. № 22, який займався дослідженнями і випробуваннями зварних з'єднань металів. У 1982–1983 рр. був укладений контракт з однією із фінських фірм про будівництво на вул. Федорова у м. Києві зазначеного вище лабораторного корпусу. На початку листопада 1984 р. Київ зустрів делегацію парламенту Фінляндії для закладки капсули на початку будівництва лабораторного корпусу. До речі, зазначена капсула має бути відкрита через 50 років від початку будівництва – у 2034 р.

Що можна ще згадати про цей день, так це те, що було дуже холодно для цієї пори року. Якщо не помиляюся, було вдень близько –17 °С, тому



Виступ представника парламенту Фінляндії на мітингу з приводу закладки капсули

всі представники України були в теплих пальто і в шапках, а представники Фінляндії, звиклі до таких низьких температур, були без головних уборів. Повернувшись після мітингу, лише думка, що незабаром ми будемо працювати у лабораторному корпусі, який ми вже називали «Фінський корпус», зігрівала нас, оскільки в ангарах було, м'яко кажучи, не дуже тепло.

Минув рік і в листопаді 1985 р. відділи почали «переселятися» у корпус № 8 ІЕЗ, а вже в першому кварталі 1986 р. від. № 80 відвідала делегація Ради Міністрів УРСР, для якої були представлені результати діяльності від. № 80 за 5 років. В той час методика отримання таких макрошліфів вперше в Європі була розроблена в ІЕЗ.

У ті роки відділ зварювання пластмас активно залучається до координаційної роботи ІЕЗ в галузі зварювання, яку інститут здійснював з 1960 р. серед різних установ і організацій СРСР. Г.М. Кораб був призначений головою секції «Зварювання пластмас» Координаційної ради зі зварювання при ДКНТ СРСР, основним завданням якої був розгляд та відбір пропозицій різних установ і організацій СРСР з розробок в галузі зварювання полімерних матеріалів для їх включення до зведеного Координаційного плану зі зварювання, що затверджувався ДКНТ СРСР (при включенні до зведеного Координаційного плану розробки фінансувалися з держбюджету міністерствами і відомствами). Розгляд пропозицій, що надійшли, проводився на щорічних засіданнях членів секції, до складу якої входили представники понад 30 установ і організацій СРСР.

У 1987–1990 рр. за науково-дослідною темою 80/5 «Удосконалення, створення і впровадження технологічного процесу, обладнання, систем контролю і автоматичного управління параметрами процесу зварювання труб діаметром до 1200 мм на



Співробітники відділів № 80 ІЕЗ та № 218 ДКТБ ІЕЗ на мітингу



Під час підписання «Настанови нащадкам» директором ІЕЗ академіком Б.Є. Патонем та представником парламенту Фінляндії

тиск 0,981 МПа з полімерних матеріалів з метою механізації і автоматизації процесу» в ІЕЗ було розроблено технологію, виготовлено обладнання та проведено лабораторні зварювання поліетиленових труб на трьох напівавтоматичних установках: ОБ-2632 – для зварювання поліетиленових труб з номінальним зовнішнім діаметром 63...225 мм; ОБ-2639 – 250...630 мм; ОБ-2640 – 710...1200 мм. У подальшому вказані установки були впроваджені в народному господарстві України.

Навіть у кризові роки від. № 80 намагався поширити досвід газифікації у Ново-Одеському районі Миколаївської області. Відповідні звернення за підписом академіка Б.Є. Патона неодноразово надсилались в державні органи влади. У листах наголошувалось на необхідності розпочати в Україні власне виробництво поліетиленових труб і зварювального обладнання. За активної участі Г.М. Кораба та заступника від. № 80 А.М. Шестопаля було підготовлено і погоджено з усіма зацікавленими міністерствами і відомствами Постанову Кабінету Міністрів України від 10 липня 1997 р. № 726 «Про виробництво і застосування поліетиленових труб у будівництві та реконструкції газових мереж у сільській місцевості». Ця Постанова зіграла значову роль у вирішенні проблеми газифікації України із застосуванням поліетиленових труб.

З метою пришвидшення газифікації сільських населених пунктів із застосуванням поліетиленових труб за ініціати́ви Г.М. Кораба і генерального директора компанії «Ельпласт» О.Ф. Гурського було створено «Асоціацію виробників і будівельників полімерних трубопроводів», першим керівником якої у 2002 р. став Г.М. Кораб. У той же рік вийшов друком новий спеціалізований журнал «Інженерні мережі з полімерних матеріалів».

Після раптової смерті Кораба Г.М. відділ очолив к.т.н. М.Г. Кораб. У 2010–2013 рр. завідувачем відділу був д.т.н. М.П. Нестеренко, а після його

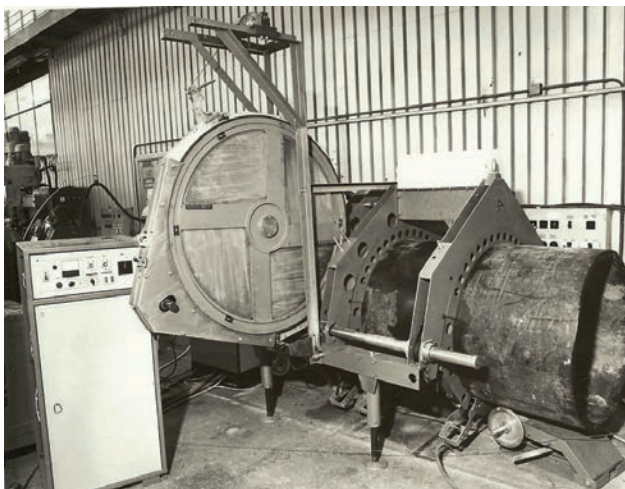


Представник делегації Ради Міністрів УРСР розглядає макрошліф зварного з'єднання поліетиленових труб

смерті обов'язки в.о. завідувача були покладені на А.М. Шестопаля.

У березні 2014 р. за рекомендацією директора Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України академіка НАН України Є.В. Лебедєва на роботу було прийнято кандидата фізико-математичних наук М.В. Юрженка. Молодий науковець очолив відділ, який, як і вся академічна наука, потерпав від постійного недофінансування. Однак керівництво інституту поставило складне завдання – розвивати фундаментальну науку та впроваджувати прикладні розробки, розширювати господарсько-договірну тематику робіт, залучати молодь і розвивати міжнародну співпрацю.

Так, 2014-2016 рр. у від. №80 стають переломними. Підписуються договори про співпрацю з вищими навчальними закладами і у відділ приходять молоді аспіранти. Проведено фундаментальні комплексні дослідження з вивчення механізмів зварювання і природи зварних з'єднань пластмас. Ці дослідження науковців відділу стали підґрунтям прикладних розробок, що захищені патентами України, технологій і устаткування, які впро-



Напівавтоматична установка ОБ-2639

ваджені на підприємствах України. Зокрема, були створені інноваційні технології та обладнання для зварювання полімерних труб без механічної підготовки торців і формування внутрішнього грата, сконструйовано медичну імобілізаційну пневматичну шину, активно розвивається технічна співпраця з ДП «КБ «Антонов» і ДП «КБ «Південне» зі зварювання високотехнологічних композитних полімерних матеріалів і виробів з них. Також тривають науково-технічні роботи у сфері адитивних технологій і створення нових типів з'єднань.

Сьогодні співробітники відділу – М.В. Юрженко, В.Л. Гохфельд, М.Г. Кораб, В.Ю. Кондраченко, М.Г. Менжерес, С.В. Карпова та ін. – становлять основу підкомітету ПК9 «Зварювання і склеювання пластмас» технічного комітету ТК44 «Зварювання та споріднені процеси і технології» Національного органу стандартизації України. Завдяки їх зусиллям і за підтримки керівника ТК44, яким є заступник директора ІЕЗ академік НАН України Л.М. Лобанов, в Україні впроваджено 2016–2020 рр. гармонізовано і введено в дію 51 міжнародний та європейський стандарт у галузі випробування полімерних матеріалів та їх зварних з'єднань. Нині співробітники від. № 80 є делегатами від України в Міжнародному інституті зварювання (IIW), експертами Міністерства освіти і науки України та Міжнародної організації зі стандартизації ISO.

Розвивається і міжнародна діяльність відділу «Зварювання пластмас». З 2014 р. відділ отримує

статус Національного інформаційного центру Глобальної мережі з екологічно безпечних пластиків в Україні. У квітні 2018 р. підписано договір про створення першої польсько-української наукової лабораторії ADPOLCOM, офіційний запуск якої відбувся в жовтні того ж року. За сприяння Посольства Французької Республіки в Україні, Французького інституту та представництва Польської академії наук в Україні науковці та аспіранти відділу отримують міжнародні гранти і проходять стажування у Франції та Польщі.

Як результат майже 40-річної праці співробітників від. № 80 у 2018 р. було підготовлено та видано нову, вже тримовну, редакцію «Словника-довідника зі зварювання та склеювання пластмас» за редакцією академіка Б. Є. Патона, яка на сьогодні користується великим попитом у спеціалістів у галузі зварювання та переробки пластмас, полімерного матеріалознавства.

Показово, що за досягнення в науковій, науково-технічній та науково-педагогічній діяльності співробітники від. №80 ставали лауреатами Державної премії України в галузі науки і техніки, премій НАН України, Верховної Ради України, стипендій НАН України та Президента України, а також були нагороджені відзнакою НАН України «Талант, натхнення, праця» та відзначені подяками Міністерства освіти і науки України та Міністерства оборони України.

Пошуки та розробки в галузі зварювання пластмас тривають.

Гохфельд В.Л.

ВИСОКОПРОДУКТИВНІ ГАЗОЗАХИСНІ МЕТАЛОПОРОШКОВІ ДРОТИ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ В МАШИНОБУДУВАННІ

ТМВ-МК5 – призначена для високошвидкісного одно- та багатопрхідного автоматичного та напівавтоматичного зварювання в захисних газах (пропонується замість дроту суцільного перерізу типу Св-08Г2С) металоконструкцій з вуглецевих та низьколегованих конструкційних та суднових сталей. Наплавлений метал має високу ударну в'язкість при температурах до -30°C .

ТМВ-МК5А – аналогічне застосування як для дроту марки ТМВ-МК5. Зварює особливо відповідальні конструкції, до яких пред'являються підвищені вимоги до пластичних характеристик наплавленого металу при температурах до -60°C .

ППс-ТМВ14 – призначена для механізованого зварювання в захисних газах, а також для наплавлення та заварювання дефектів лиття металоконструкцій з теплостійких сталей типу 12МХ, 15ХМ, 20ХМЛ, 12Х2М1, 12Х1МФ, 12Х2МФБ, 12Х2МФСР, 15Х1М1Ф, 20ХМФ1, 20Х5МЛ і їм подібних за

ГОСТ 5632 та ГОСТ 20072, що працюють при температурі до 540°C .

ППс-ТМВ15 – призначена для механізованого зварювання в захисних газах, а також для наплавлення та заварювання дефектів лиття металоконструкцій з теплостійких сталей типу 12МХ, 15ХМ, 20ХМЛ, 12Х2М1, 12Х1МФ, 12Х2МФБ, 12Х2МФСР, 15Х1М1Ф, 20ХМФ1, 20Х5МЛ і їм подібних за ГОСТ 5632 та ГОСТ 20072, що працюють при температурі до 560°C .

ППс-ТМВ69 – призначена для зварювання в захисних газах високоміцних сталей з межею плинності до 700 МПа, таких як S700МС, сталей типу 13ХГМРБ, 13Г2МРФБ, 14ХГНМ, 12ГН2МФЮА тощо. Наплавлений метал має високу ударну в'язкість при температурах до -40°C .

Область застосування

ТМВ-МК5, ТМВ-МК5А. Металоконструкції різного призначення. Зварювання тонкостінних

Марка дроту*	Тип наплавленого металу	Ø, мм	Стандарт EN ISO
ТМВ-МК5	08Г1	1,2...1,6	17632 – А
ТМВ-МК5А	08Г1	1,2...1,6	17632 – А
ППс-ТМВ14	08ХМ	1,2...1,6	17634 – А
ППс-ТМВ-15	08ХМФ	1,2...1,6	17634 – А
ППс-ТМВ69	08Г2Н1ХМФ	1,2...1,6	16834 – А

* – захисний газ С1 (100% CO₂), М21 (82 % Ar + 18 % CO₂)

Типові механічні властивості наплавленого металу шва із захисної суміші М21 (82 % Ar + 18 % CO₂)

Марка дроту	σ _т , МПа	σ _в , МПа	δ, %	Робота удару K _т , Дж при T °C				
	не менше			не менше				
				+20	0	-20	-40	-60
ТМВ-МК5	380	520	24	120	100	90	40	-
ТМВ-МК5А	440	560	24	140	120	110	70	40
ППс-ТМВ14*	500	600	18	100	80	50	-	-
ППс-ТМВ15**	550	650	16	80	60	40		
ППс-ТМВ69	700	750	18	120	110	90	70	

* Термообробка: високий відпуск (725±15)°C, (1,0...1,5) год.

** Термообробка: високий відпуск 680...730 °C, 1 год.



виробів, кузовні деталі автомобілів, мостові та будівельні металоконструкції, транспортне та вантажопідйомне обладнання, машинобудування.

ППс-ТМВ14. Транспортне машинобудування, технологічні ємності, судини, що працюють під тиском, теплообмінні панелі, ректифікаційні колони, каталітичні реактори, резервуари та трубопроводи, металургія.

ППс-ТМВ15. Транспортне машинобудування, технологічні ємності, судини, резервуари та трубопроводи, теплообмінники, паропроводи, металургія.

ППс-ТМВ69. Зварювання та ремонт лиття зі сталей підвищеної міцності, ремонт обладнання, будівельні металоконструкції, машинобудування, металургія.

Переваги

- порівняно з суцільним дротом металопорошкові дроти відрізняються стабільним горінням дуги з дуже низьким рівнем розбризкування, кращим формуванням зварювального шва;

- при напівавтоматичному зварюванні металопорошковий дріт діаметром 1,2 та 1,6 мм відрізняється високими зварювально-технологічними характеристиками та підвищеною продуктивністю наплавлення в порівнянні з суцільним дротом Св08Г2С діаметром 1,2 мм;

- до складу металопорошкового дроту вводяться спеціальні компоненти, завдяки чому він забезпечує стійкість наплавленого металу до утворення пористості при зварюванні по забрудненій поверхні;

- металопорошковий зварювальний дріт порівняно із суцільним дротом відрізняється кращими санітарно-гігієнічними характеристиками: меншим виділенням зварювального аерозолі та зниженим рівнем шуму;

- за рахунок низького вмісту сірки та фосфору в наплавленому металі, при зварюванні металопорошковими дротами марок ТМВ-МК5 та ТМВ-МК5А, шви відрізняються підвищеними механічними властивостями;

- добре видима та зручна в роботі дуга знижує вимоги до якості підготовки та припасування з'єднань, дозволяє використовувати в процесі проведення зварювальних робіт у багатьох випадках менш кваліфікований персонал;

- завдяки високій швидкості зварювання, відсутності розбризкування електродного металу ефективна для високопродуктивного механізованого та роботизованого зварювання.

Ефективна економіка зварних металоконструкцій машинобудування – це не стільки вартість зварювального матеріалу, скільки ефективність комплексу витрат для виготовлення всієї металоконструкції.

А.А. Голякевич

ПЕРЕДПЛАТА 2022

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

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделоллю.

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

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

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



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

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм.

Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм. А5 – 185x130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель CMYK, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

ВИДАВНИЦТВО

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



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



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