

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

10
2022

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

Академік НАН України Ігор Кривцун: «Ми продовжуємо справу Бориса Патона»3

ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ І НАПЛАВЛЕННЯ

Коваленко Д.В., [Коваленко І.В.], Задерій Б.О., Звягінцева Г.В. Застосування А-TIG зварювання для вдосконалення технології виготовлення та ремонту вузлів газотурбінних двигунів і установок із титанових сплавів7

Размишляев О.Д., Максимов С.Ю., Берднікова О.М., Прилипко О.О., Кушнарєва О.С., Алексеєнко Т.О. Вплив конфігурації зовнішнього електромагнітного поля на структуру металу зварних з'єднань конструкційної сталі17

Гущин К.В., Зякор І.В., Самотрясов С.М., Завертанний М.С., Левчук А.М., Wang Qichen. Особливості попереднього нагріву опором при контактному стиковому зварюванні оплавленням товстостінних деталей з алюмінієвих сплавів22

ЗВАРЮВАННЯ В ТВЕРДІЙ ФАЗІ

Серебряник І.П., Полещук М.А., Зубер Т.О., Бородин А.І., Тунік А.Ю., Лось О.А. Особливості формування та властивості з'єднання латунь-сталь, отриманого плакуванням в автовакуумі29

ЗВАРЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ

Жерносеков А.М., Андріанов О.А., Рymar С.В., Шатан О.Ф., Муха А.О. Вищі гармоніки струму в трансформаторних джерелах живлення з імпульсними пристроями стабілізації горіння зварювальної дуги35

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Колісниченко О.В., Тюрін Ю.М., Полещук М.А. Нанесення керамічного покриття на поверхню пористої матриці інфрачервоного газового пальника42

Пащенко В.М. Спеціалізовані плазмові пристрої для створення градієнтних покриттів плазмово-порошковим напленням47

ІНФОРМАЦІЯ

75-та асамблея Міжнародного інституту зварювання54

Співпраця ІЕЗ та «СМНВО-Інжиніринг»55

Швидкий і простий метод зварювання TIG холодним дротом57

ПАТОН ІНТЕРНЕТШЛ – продовжуємо працювати на економіку України59

Календар жовтня61

CONTENT

Prof. Ihor Krivtsun: «We continue the case of Boris Paton»3

TECHNOLOGY OF ARC WELDING AND SURFACING

Kovalenko D.V., [Kovalenko I.V.], Zaderii B.O., Zvyagintseva G.V. Application of A-TIG welding for improving the technology of manufacturing and repair of units of gas turbine engines and installations from titanium alloys7

Razmyshlyayev O.D., Maksymov S.Yu., Berdnikova O.M., Prylypko O.O., Kushnyaryova O.S., Alekseyenko T.O. Effect of external electromagnetic field configuration on metal structure of welded joints of structural steel17

Hushchyn K.V., Zyakhor I.V., Samotryasov S.M., Zaverannyy M.S., Levchuk A.M., Wang Qichen. Features of resistance preheating at flash-butt welding of thick-walled parts from aluminium alloys22

WELDING IN THE SOLID PHASE

Serebryanyk I.P., Poleshchuk M.A., Zuber T.O., Borodin A.I., Tunik A.Yu., Los O.A. Characteristics of formation and properties of brass-steel joint produced by autovacuum cladding29

WELDING EQUIPMENT

Zhernosekov A.M., Andrianov O.A., Rymar S.V., Shatan O.F., Mukha A.O. Higher current harmonics in transformer power sources with pulsed devices of welding arc stabilization35

PROTECTIVE COATINGS

Kolisnichenko O.V., Tyurin Yu.M., Poleshchuk M.A. Deposition of ceramic coating on the surface of a porous matrix of infrared gas torch42

Pashchenko V.M. Specialized plasma devices for producing gradient coatings by plasma powder spraying47

INFORMATION

The 75th IIW Annual Assembly54

Cooperation of PWI and «SMBSPA-Engineering»55

Cold-wire TIG welding – the easy way57

PATON INTERNATIONAL – we continue to work for the economy of Ukraine59

October calendar61



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

Засновники

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

Адреса

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

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2023

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

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

Founders

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

Address

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

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal

Certificate of state registration
of KV 4788 dated 09.01.2001
ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

Subscription 2023

Subscription index 70031.
12 issues per year (issued monthly), back issues available.
\$384, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
\$312, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
Subscription is possible for previous issues for any year.
Articles from «Автоматичне Зварювання» (Automatic Welding)
journal is republished selectively in English in
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj
Publisher is not responsible
for the content of the promotional material.

АКАДЕМІК НАН УКРАЇНИ ІГОР КРІВЦУН: «МИ ПРОДОВЖУЄМО СПРАВУ БОРИСА ПАТОНА»

*Інтерв'ю директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона
академіка Ігоря Кривцуна спеціально для YouTube-каналу Національної академії наук України.
19.09.2022*

Про те, як живе легендарний Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, переорієнтацію основних напрямів наукових досліджень з урахуванням викликів сьогодення, передові результати прикладних досліджень науковців у галузі електрозварювання та споріднених технологій, які вже приносять користь для суспільства і держави, а також як поєднує роботу в Інституті та у Відділенні фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України та своє бачення того, як зробити зв'язок між наукою і виробництвом максимально тісним та ефективним в інтерв'ю програмі «Про науку. Компетентно» (ведучий – академік Володимир Семиноженко) для YouTube-каналу НАН України розповів директор Інституту електрозварювання, академік-секретар Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України академік Ігор Кривцун.



– Вітаю, Ігорю Віталійовичу! За останні два роки у Вашому житті відбулось багато змін – Ви стали директором легендарного Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, якщо можна так сказати, спадкоємцем самого Бориса Євгеновича Патона, і очолили найбільше відділення Національної академії наук України – Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства. Обидві посади надзвичайно вагомі. Розкажіть, будь ласка, як проходить Ваш робочий день? Як вдається поєднувати ці дві посади?

– О 8:30 я вже в Інституті, хоча робочий день починається значно раніше – треба ознайомитись з останніми новинами, спланувати свій день. Щодня о 9:00 проводжу нараду за участі заступників директора, головного інженера та вченого секретаря Інституту, де розглядаються актуальні наукові, організаційні та інженерно-технічні питання, приймаються відповідні рішення та надаються необхідні доручення. Це традиція, яку започаткував ще Борис Євгенович... Після цього – робота з документами (листами, договорами, заявами співробітників та ін.), яких буває декілька десятків на день, проводжу заплановані, а останнім часом часто й незаплановані зустрічі, наради із представниками наукових та допоміжних

відділів і служб Інституту. Так проходить перша половина дня.

Винятком є п'ятниця. Цього дня я намагаюся хоча б 2–3 години присвятити власне науковій роботі (поки що не закинув це заняття). Цього часу зазвичай не вистачає, тому додатково використовую один із вихідних днів. У суботу та неділю в Інституті тихо, телефони мовчать, співробітники відпочивають. Одним словом – краса – вдається «начертати пару формул».

У робочі дні у другій половині дня я приїжджаю до Президії та працюю у Відділенні, де здебільшого займаюся питаннями координації діяльності наукових установ, яких у нашому відділенні 10, а також державних госпрозрахункових підприємств, яких у нашому Відділенні є найбільша кількість. Кожного другого вівторка проводжу засідання Бюро Відділення, кожну другу середу беру участь у засіданні Президії НАН України. В інші дні зустрічаюся з колегами, керівництвом Академії, багато питань доводиться вирішувати телефоном або за допомогою комп'ютера в режимі online. Наприкінці дня іноді повертаюся в Інститут, де треба доробити те, що не встиг з ранку.

Ось так і проходить мій робочий день.

– Давайте поговоримо про Інститут електрозварювання. Очолювати його після Бориса Євгеновича – це водночас і почесно, і ризиковано, і велика відповідальність. Але Ви, як новий керівник, напевно, запровадили щось нове, якісь зміни. Які Ви зробили найбільші організаційні зміни і як це віддзеркалюється на тематиці, нових акцентах діяльності Інституту?

– Звістка про смерть Бориса Євгеновича була шоком для всіх співробітників Академії, нашого Інституту та, звісно, для мене особисто. Наступною шокуючою новиною для мене стало розпорядження Президії НАН України щодо мого призначення в.о. директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона – легендарного й одного з найбільших інститутів нашої Академії, фактично спадкоємцем самого Бориса Євгеновича. Відповідальність – величезна. Впоратися мені допоміг колектив Інституту, який підтримав мою кандидатуру на виборах директора більш ніж 95 % голосів.

Далі потрібно було працювати. Проблеми, які стояли перед Інститутом на той момент, я розділив на три основні групи: економічні, науково-технічні та організаційні. Перша – це недостатнє бюджетне фінансування Інституту і низький рівень позабюджетних надходжень від виконання робіт за господарською та конкурсною тематикою, а також надходжень від здачі в оренду вільної площі. Друга група проблем була пов'язана з рівнем фундаментальних та прикладних досліджень окремих наукових відділів, який на той час не відповідав вимогам Академії, низькими, а для деяких підрозділів нульовими, показниками практичного використання результатів проведених досліджень та впровадження розробок. До третьої групи проблем були віднесені кадрові питання. В першу чергу недостатня кількість наукової молоді, проблеми оптимізації структури та організації ефективної роботи наукових та допоміжних відділів Інституту, використання площі, обладнання, енергоносіїв.

Саме за цими напрямками і розпочались організаційні зміни. Так, у 2021 р. було проведено кадрові перестановки у керівництві Інституту, змінено структуру наукових і допоміжних відділів, оновлено склад Вченої ради та, найголовніше, оптимізовано розподіл наукових відділів за секціями ради.

Наступним кроком було проведення рейтингування наукових відділів і лабораторій. Його результати були використані при розподілі бюджетного фінансування та реорганізації частини наукових підрозділів Інституту у 2022 р. Рейтингування проводилося за трьома основними показниками роботи відділів за попередній рік. Це кадрове забезпечення, включаючи наявність у відділі докторів та кандидатів наук, у т.ч. молодих науковців, підготовку аспірантів та докторантів. Друге – це наукові

показники, які враховували кількість і рівень публікацій та патентів, виступи з доповідями на різних наукових конференціях, симпозіумах тощо. І, зрештою, третє – це показники господарської діяльності наукових підрозділів Інституту.

Результати цього рейтингування були використані вже у 2021 р. Це дозволило нам перерозподілити бюджетне фінансування відповідно до рейтингу відділів. Це було дуже важливо. Кожен відділ розумів, що чим вищий рейтинг, тим більше грошей. А 5 відділів було реорганізовано через низькі показники їхньої діяльності.

Рейтингування було проведено і цього року, а аналіз його результатів на засіданні Вченої ради показав суттєве збільшення всіх показників для багатьох відділів та лабораторій Інституту.

Для підвищення позабюджетних надходжень було прийнято рішення про запровадження диференційної системи визначення відсотка накладних витрат з господарської тематики (від 25 до 65 %). Чим більше підрозділи мали надходжень до спеціального фонду Інституту попереднього року, тим нижчим був цей показник. У результаті надходження грошей за рахунок господарчих договорів у 2021 р. збільшилось на 36 % порівняно з 2020 р. Щодо конкурсної тематики, то вона за 2021 р. збільшилася на 60 %. Тобто минулого року ми мали досить непогані показники.

Нарешті, у 2021 р. розпочалася оптимізація розташування відділів Інституту на наявних площах, включаючи кабінетні, лабораторні та виробничі, яка продовжується і поточного року, що важливо з точки зору економії енергоресурсів, особливо в осінньо-зимовий період 2022–2023 рр.

Крім організаційних змін, у 2020 р. було проведено перегляд наукової тематики Інституту. В першу чергу, потрібно було сконцентруватися на найбільш сучасних, найбільш актуальних напрямках досліджень в галузі зварювання та споріднених технологій, наприклад, на адитивних технологіях.

Як результат, за два роки було створено лабораторне обладнання та відпрацьовано електронно-променеві технології 3D-друку виробів різного призначення з використанням металевих дрітків та порошків (титанові, нікелеві, алюмінієві сплави). Такі технології зараз активно розвиваються в Європі (Швеція, Німеччина). Наш підхід дозволяє використовувати саме наші вітчизняні порошки. З використанням цієї технології ми виготовляємо та відновлюємо різноманітні деталі для різних галузей промисловості. Крім цього, технологія використовується у медичній сфері. Наприклад, ми виготовляємо штучні імпланти з титану для проведення хірургічних операцій.

Також продовжуємо удосконалювати технологію зварювання живих тканин. Ми розробили

інструмент для зупинення шлункових кровотеч. Смертність від таких кровотеч становила 17 %, з використанням розробленого нами інструмента ризик смертності зменшується до 3 %. Зараз ми розпочали виробництво таких зондів для широкого розповсюдження в медичних установах України.

Крім того, наші науковці створили срібловмісні полімерні плівкові наноматеріали та філаменти з них, які дозволяють шляхом 3D-друку виготовляти полімерні вироби з противірусною та антимікробною дією, при цьому безпечні для людини. Як довели дослідження, такі вироби убезпечені від патогенних мікроорганізмів і вірусів, таких як стафілокок, вірус грипу H1N1 та деяких інших, без дезінфекції поверхонь.

– Напевно, останні півроку обставини змусили Ваш Інститут змінити напрями діяльності. Які нові розробки, про які можна говорити публічно, з'явилися у військовий час?

Вся історія нашого Інституту, починаючи зі створення способу автоматичного зварювання під флюсом та його практичного використання для виготовлення бронекорпусів легендарного танка Т-34 (до речі, найкращого середнього танка Другої світової війни), нерозривно пов'язана з науковими дослідженнями та прикладними розробками, спрямованими на підвищення обороноздатності країни.

І сьогодні, в ході військової агресії РФ проти незалежної України, наш Інститут разом з дослідними заводами, інженерними центрами та іншими організаціями, що входять до складу НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України», продовжує активну роботу в цьому напрямі.

З цією метою було створено спеціальну робочу групу, яка контактує з представниками МО та ЗСУ, аналізує їх запити та потреби, насамперед у здійсненні ремонту та відновленні військової техніки, пропонує практичні рішення нагальних завдань оборони України. Ці роботи сьогодні проводяться не лише силами нашого Інституту, а й інших інститутів та підприємств нашого Відділення. Говорити тут про конкретні приклади подібних робіт я, на жаль, не можу з цілком зрозумілих причин.

– Ви зазначили, що до складу НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» входить і інститут, і багато науково-технічних центрів, державних підприємств. Сьогодні знову актуалізується питання як повинні бути організовані такі установи, які займаються не тільки фундаментальними дослідженнями, а і прикладними розробками. На Ваш погляд, які потрібно провести структурні зміни в установах Академії, щоб вони були більш ефективними з точки зору економічних результатів?

– На мій погляд, інститути НАН України, які займаються не лише фундаментальними дослі-

дженнями, а й прикладними розробками, їхньою практичною реалізацією, якраз і є тією формою наукової організації, яка буде ефективною у післявоєнний період. Структура подібних організацій має включати власне інститут, як науково-дослідну організацію, конструкторське бюро, здатне втілити результати виконаних досліджень у конструкції конкретних виробів. Вона має включати дослідне виробництво для виготовлення дослідних партій виробів, один або кілька інженерних центрів для адаптації та впровадження створених технологій та розробок в умовах промислових підприємств. Саме таку структуру сьогодні має Науково-технічний комплекс «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України».

Ця схема «науково-дослідний інститут – конструкторське бюро – дослідне виробництво», яка була запропонована Борисом Євгеновичем Патонам ще у 80-х роках минулого століття, дозволяє відтворити весь ланцюжок – від дослідження та розробки до практичного впровадження нових технологій і обладнання, успішно працює дотепер і буде актуальною ще багато років.

– А яку роль мають відігравати недержавні, комерційні підприємства для того, щоб наука була ефективною?

– Не тільки для нашого Інституту, але й для багатьох інститутів нашого Відділення взаємодія з промисловими підприємствами це найважливіша проблема. Потрібно розуміти, що сьогодні така взаємодія повинна бути не лише з державними, а й приватними підприємствами. Для інноваційного розвитку багатьох галузей національної економіки державно-приватне партнерство є архіважливим. На жаль, ми ще поки що далекі від конкретних кроків щодо практичної реалізації цього підходу. Ми знаємо, що є Закон України «Про державно-приватне партнерство», який визначає організаційно-правові засади взаємодії державних партнерів з приватними партнерами та основні принципи державно-приватного партнерства на договірній основі. Але на практиці це дуже складно реалізувати.

– Традиційно академіком-секретарем обирався представник найбільшої організації Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства. І таким чином транспонує традиції Інституту на всі установи Відділення. Я думаю, що Ви будете передавати досвід Інституту електрозварювання щодо організаційної структури та більшого практичного спрямування діяльності на інші установи Відділення. Як Ви вважаєте, чи достатньо ефективно зараз практично впроваджуються результати діяльності академічних установ?

– Деякі інститути нашої Академії мають дуже цікаві наукові результати, проте вони так і зали-

шаються «на полицях», не мають практичного впровадження.

Тож ми завжди намагаємось поділитися досвідом та традиціями, «підштовхнути» інші установи Відділення до того, щоб спрямовувати свою роботу на кінцевий результат, який би давав користь суспільству, споживачу.

– Чи вважаєте Ви, що необхідно повпливати і на кардинальну зміну тематики деяких інститутів? Наприклад, якщо прикладна тематика установи не реалізується, чи потрібно тоді її фінансувати з державного бюджету?

– Я вважаю, що все, що стосується прикладної тематики, має давати користь суспільству, конкретному споживачу. Інакше це марнотратство. Гроші треба виділяти тільки на те, що працює потім на конкретного споживача.

– Відділення, яке Ви очолюєте, мені здається, єдине серед інших відділень Академії, дуже системно підійшло до перерозподілу бюджетних коштів за результатами роботи. В тому числі і завдяки системі рейтингування, яка була започаткована в Інституті електрозварювання, але поширилась на інші установи Відділення. Чи знайшов відгук такий підхід серед Ваших колег з інших відділень НАН України?

– В певному сенсі інші відділення НАН України рухаються до удосконалення своєї діяльності. Але я вважаю, що потрібно ще удосконалювати методики оцінювання діяльності наукових установ та структурних підрозділів. Започаткована в нашому Інституті система рейтингування, яку потім запозичили й інші установи нашого Відділення, пройшла багато обговорень і її застосування зараз дає реальний результат. Можу сказати, що за підсумками розподілу базового фінансування у минулому році, всі інститути нашого Відділення погодились, що воно було справедливим.

– Ми розуміємо, що війна завдала багато збитків установам Академії. На Вашу думку, враховуючи цей чинник, як потрібно підходити до рейтингування та розподілу коштів цього року?

– Я вважаю, що, в першу чергу, треба враховувати збитки установам, які були завдані внаслідок

російської агресії. Можливо потрібно буде давати деякі преференції при розподілі базового фінансування тим інститутам, які зазнали руйнувань.

Рейтингування, я гадаю, ми можемо провести і будемо проводити для того, щоб побачити як хто впорався з тими завданнями, які були поставлені на цей рік. Ми розуміємо, що були зміни і пріоритетних напрямів дослідження, і планів... Але інститути, які в умовах війни змогли ефективно продовжити свою роботу, мають бути прикладом для інших. Рейтингування буде проведене не лише з урахуванням визначених показників, але й з урахуванням умов, в яких працюють інститути.

– Традиційне питання: як Ви зустріли 24 лютого?

– Те, що почалася війна, я зрозумів одразу, почувши на світанку сильні вибухи. Списати це на грозу і грім у лютому не вдалося, оскільки вид з вікна моєї квартири, в напрямку Жулян, свідчив, що це був ракетний обстріл аеропорту «Київ».

Вранці 24 лютого все керівництво Інституту було на робочих місцях. Ми провели екстрену нараду. Потрібно було вирішити нагальні питання для забезпечення діяльності та безпеки нашої установи в умовах війни. В Інституті було встановлено режим цілодобового чергування, в т.ч. представників керівництва. Ті, хто був задіяний у чергуванні – забезпечували підтримання порядку, функціонування всіх інженерно-технічних систем, недопущення сторонніх осіб на територію і до приміщень Інституту, зв'язок з Президією Академії та Державною адміністрацією Голосіївського району Києва. Більшість співробітників були переведені на дистанційний режим роботи.

– Ігорю Віталійовичу, я Вам дякую за дуже інформативну і цікаву розмову. Я сподіваюсь, завжди, і Відділення, яке Ви очолюєте, і Інститут електрозварювання буде зразком для науки України і для нашої Академії наук України.

– Дякую! Я гадаю так і буде. Ми працюємо у цьому напрямку.

*За матеріалами
YouTube-каналу НАН України*



ЗАСТОСУВАННЯ А-TIG ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА РЕМОНТУ ВУЗЛІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ І УСТАНОВОК ІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Д.В. Коваленко, І.В. Коваленко, Б.О. Задерій, Г.В. Звягінцева

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

Показано переваги застосування технології А-TIG зварювання (TIG зварювання по шару активуючого флюсу – активатора) конструктивно складних елементів з титанових сплавів, що включають стикові та точкові напусткові різновиди з'єднання, а також з'єднання зі змінним тепловідведенням. Досліджено співвідношення геометрії швів, структури та властивостей зварних з'єднань, виконаних TIG та А-TIG способами зварювання. Технологія А-TIG зварювання відпрацьована в промислових умовах при створенні та ремонті проблемних вузлів авіаційних та конвертованих газотурбінних двигунів. Спосіб А-TIG зварювання рекомендується для промислового впровадження при створенні зварювальних конструкцій з титанових сплавів складної геометрії. Бібліогр. 15, табл. 7, рис. 12.

Ключові слова: TIG та А-TIG зварювання, активатори, титанові сплави, стикові та точкові напусткові з'єднання, змінне тепловідведення, формування шва, структура та властивості

Вступ. Поліпшення якості, підвищення надійності та ресурсу роботи зварних конструкцій, зниження ваги та витрат при їх виготовленні постійно перебувають у центрі уваги в промисловому виробництві. Особливо актуальним, навіть критичним є необхідність вирішення вказаних питань при створенні складнонавантажених високовідповідальних вузлів авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД). Використання складнолегованих сплавів та передових технологій виготовлення не завжди дозволяють досягти все зростаючих вимог та показників. Тому все частіше вирішення питань досягається за рахунок вдосконалення (при неминучому ускладненні) конструкції вузлів ГТД, створення яких за допомогою зварювання із окремих елементів в багатьох випадках виявляється найбільш економічним і технологічним, якщо не єдиним способом. Прикладом можуть бути цільнозварні ротори, робочі колеса, складені лопатки та ін. З огляду на специфіку матеріалу та особливості конструкцій вузлів ГТД пошук технологічного, менш трудомісткого, безвідходного способу їх зварювання є досить актуальним.

Ціль роботи – дослідження можливостей та розробка технології А-TIG зварювання стикових та точкових напусткових з'єднань тонколистових (завтовшки $\delta = 1,2 \dots 2,0$ мм) титанових сплавів BT-20 та OT-4-1.

Дана робота використовує результати досліджень механізму проплавлення металу, що зварюється, і заснованих на них прогресивних підходів щодо вдосконалення технології зварювання. Одним із таких підходів є застосування А-TIG

зварювання (TIG зварювання по шару активуючого флюсу – активатора) при виготовленні конструкцій зі сталей [1–6], нікелевих [7] та титанових сплавів [8–15]. Основні позитивні ефекти застосування активаторів при А-TIG зварюванні усіх вказаних матеріалів, порівняно із звичайним TIG зварюванням, проявляються у підвищенні проплавляючої здатності процесу (глибоке проплавлення), зниженні погонної енергії, зменшенні протяжності ЗТВ, а також відсутності пор у швах (рис. 1 і 2). При А-TIG зварюванні титанових сплавів це відбувається в основному завдяки контрагуванню зварювальної дуги продуктами термічної дисоціації компонентів активатора, що розплавляється [8, 10, 11, 15]. При цьому також змінюється кінетика проплавлення, значно зменшується ширина, змінюється геометрія та форма проплавлення шва. При незмінній однаковій швидкості зварювання застосування активатора при А-TIG зварюванні дозволяє в 1,5...2,0 рази знизити величину струму зварювання без зміни (зі збереженням) проплавлення (рис. 3), а отже, зменшуються перегрів металу, що зварюється, зварювальні напруги і деформації.

Розглядаються наступні варіанти та переваги промислового застосування способу А-TIG зварювання при виготовленні вузлів газотурбінних двигунів та установок:

а) для стикових з'єднань при зварюванні вузлів з нерівномірним тепловідведенням від місця зварювання:

– підвищується у кілька разів стабільність формування швів;

Коваленко Д.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8544-588X>, Задерій Б.О. – <https://orcid.org/0000-0001-6695-6986>

© Д.В. Коваленко, І.В. Коваленко, Б.О. Задерій, Г.В. Звягінцева, 2022

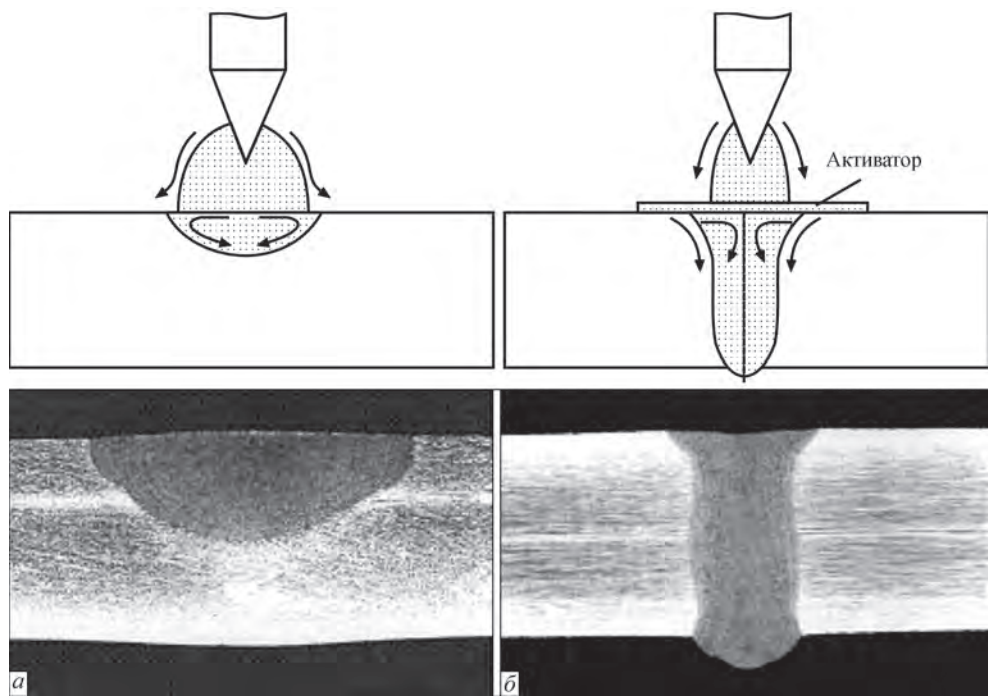


Рис. 1. Схематичні зображення та зовнішній вигляд зварних швів із нержавіючої сталі 04X18H10T завтовшки $\delta = 6$ мм, виконаних процесами TIG (а) та А-TIG (б) зварювання на одному режимі зварювання: струм зварювання $I_{зв} = 200$ А; швидкість зварювання $V_{зв} = 120$ мм/хв, довжина дуги $l_d = 1,5$ мм [1]

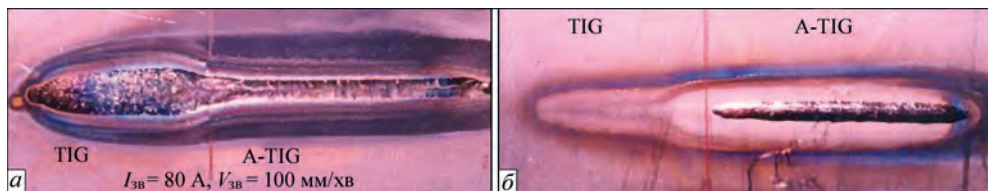


Рис. 2. Зовнішній вигляд зварних швів, виконаних TIG (ліворуч) та А-TIG (праворуч) зварюванням титанового сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 3$ мм на одному режимі зварювання: струм зварювання $I_{зв} = 80$ А; швидкість зварювання $V_{зв} = 100$ мм/хв: а – зовнішня поверхня шва; б – зворотня поверхня (корінь) шва (результати особистих досліджень)

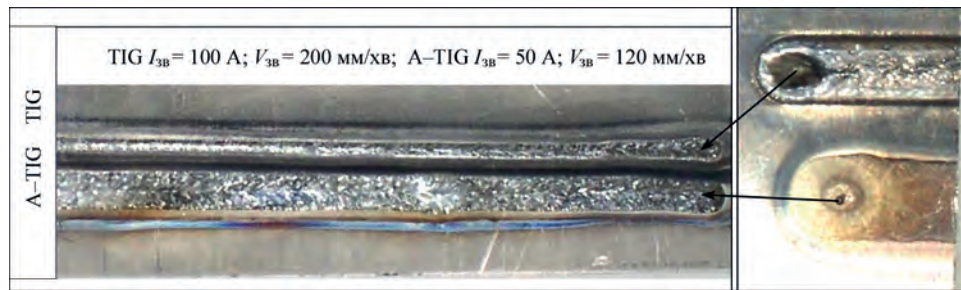


Рис. 3. Зовнішній вигляд поверхні зварних швів при повному проплавленні, виконаних TIG та А-TIG зварюванням титанового сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм при однаковій швидкості зварювання $V_{зв} = 200$ мм/хв: зверху – А-TIG шов, струм зварювання 50 А; знизу – TIG шов, струм зварювання $I_{зв} = 100$ А (результати особистих досліджень)

– з’являється можливість отримання якісних зварних швів конструкцій, товщина елементів, що з’єднуються, яких відрізняється в 2...3 рази.

б) для напусткових з’єднань:

- усувається необхідність у засверлівці елементів, що зварюються, в місці з’єднання;
- забезпечується можливість отримання якісних зварних точок при зазорі між елементами, що з’єднуються, до 0,5 товщини (δ) зварюваних металів, а із застосуванням присадки – до 1,0 δ ;

Технологія А-TIG зварювання може бути успішно застосована при зварюванні деталей

змінного перерізу, таврових та різнотовщинних вузлів. Особливо ефективно її застосування при зварюванні високоточних, складнонавантажених вузлів та деталей двигунів та установок із структурночутливих жароміцних сплавів на основі заліза, нікелю та титану.

Методи та матеріали досліджень. Основне завдання промислового впровадження нового способу А-TIG зварювання полягає в тому, щоб адаптувати запропоновані способи та реалізувати їх переваги стосовно конкретних умов, обладнання,

вузлів та сплавів. Типи зварних з'єднань визначалися ТУ на виріб.

Конструктивне оформлення – стикові (рис. 4, а, в) та напусткові точкові (рис. 4, б) з'єднання. Матеріал – сплави титану ВТ-20 та ОТ-4-1. Габарити вузлів та виробів: діаметр 1200...1500 мм, товщина $\delta = 1,2; 1,5; 2,0$ мм. Більшість експериментів проводилися на плоских зразках: стикові з'єднання, сплав ВТ-20, розмір зразків – $150 \times 150 \times 2$ мм, $220 \times 80 \times 2$ мм, $220 \times 50 \times 1,2$ мм; точкові напусткові з'єднання, сплави ВТ-20 та ОТ-4-1 у різномірному поєднанні, розмір зразків – 100×60 мм завтовшки $\delta = 2+2; 1,5+1,5; 1,5+1,2$ мм.

Вимоги до оформлення швів:

– стикові – геометрія та розмір швів відповідно до ГОСТ 1474-76;

– точкові – геометрія та розміри швів відповідно до ГОСТ 14776-79 (14778-76), діаметр точки з лицьового боку шва 6...10 мм, кореневий 5...7 мм, посилення (ослаблення) шва ($\pm 0,2$ мм).

Механічні та службові характеристики зварних з'єднань повинні бути не нижче 0,9 від властивостей основного металу. Обмеження по деформаціям зварних з'єднань та напругою в них уточнюються у процесі освоєння розробки на конкретних вузлах з урахуванням існуючого оснащення та подальшої термообробки.

Методи, обсяг та норми контролю зварних швів: зовнішній огляд – 100 %.

Перевіряється наявність та величина підрізів, тріщин на поверхні, наявність бризок. Радіографічний контроль – 100 % зварних швів. Визначається наявність непроварів, несплавлень, тріщин, пор та раковин усередині зварного шва.

Розробка, крім виконання перерахованих технічних умов, повинна була забезпечити:

– для стикових з'єднань: виключення несплавлень, зміщення проплавлення від стику; попередження проплавів, спричинених нерівномірним тепловідведенням; підвищення стабільності формування швів;

– для напусткових з'єднань: виключення необхідності засвердлювання під зварювання; отримання якісних точкових з'єднань при підвищених зазорах.

Тип зварювального обладнання, його параметри, режими та умови зварювання вибирали виходячи з умов необхідності отримання якісного формування швів на металі відповідної товщини та марки, а також з урахуванням застосовуваних у виробництві обладнання та технологій. Як джерела живлення зварювальної дуги використовували випрямляч ВСВУ-315. Точкові напусткові зварні з'єднання виконували в камерах з контрольною захисною атмосферою «Атмосфера-6м» та Об-427. Застосування таких камер викликано необхідністю надійного та стабільного захисту зварювальної ванни та зони термічного впливу від шкідливого впливу повітря, особливо у місці накладання одного листового елемента на інший. Крім того, у таких камерах можливе безперервний контроль складу захисної атмосфери. Зварювання зразків для визначення впливу тепловідведення виконували в зварювальному столі з вибіркою по стику 5×10 мм і притисками пластин, що зварюються, на відстані по 10 мм від лінії стику (рис. 5, а). Для захисту від окислення при зварюванні поза камерою застосовували піддув інертного газу (аргону), через вибірку в столі з кореневої части-

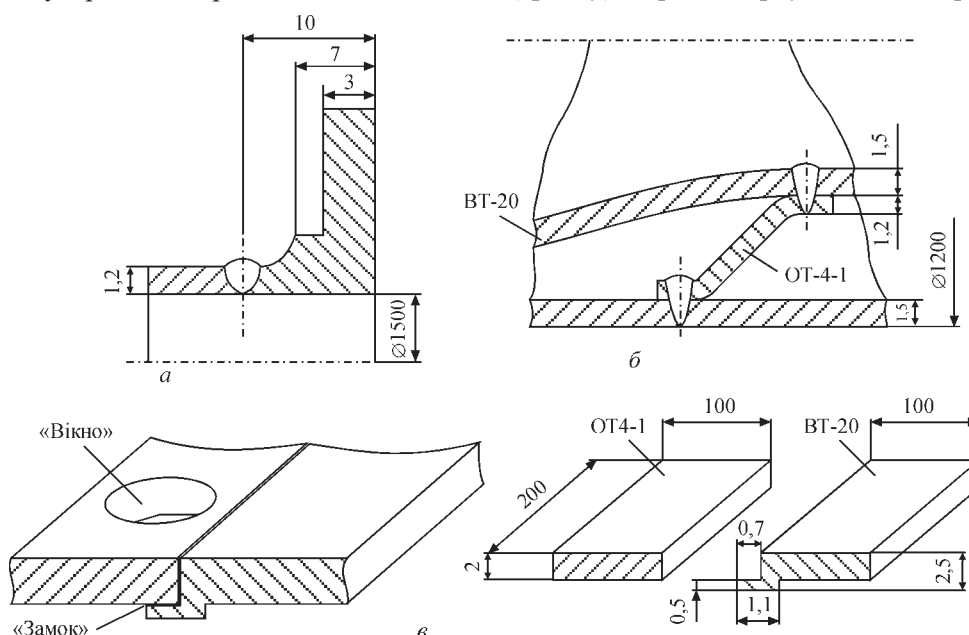


Рис. 4. Схеми фрагментів зварних вузлів: обичайка-фланець (несиметричне тепловідведення), стикове з'єднання зі сплавом ОТ-4 (а); обичайка з напустковими точковими з'єднаннями зі сплавів ОТ-4 та ВТ-20 (б); обичайка з вікном, стикове замкове з'єднання зі сплавів ОТ-4 і ВТ-20 (ескіз (ліворуч) та елементи (праворуч) зварного з'єднання (в))

Таблиця 1. Режими зварювання та характеристики стикових швів зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм

Номер п/п	Спосіб зварювання	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Швидкість зварювання $V_{зв}$, мм/хв	Ширина шва B – поверхня/ ϵ – корінь, мм	Відхилення осі шва від лінії стику, мм		Прогин уздовж осі Δ , мм
					середні	випади*	
1	ТІГ	85	170	$\frac{8,0...8,2}{4,0...4,8}$	$\frac{0,3}{0,5}$	$\frac{0,6}{1,2}$	12,8
2	A-TIG	80	340	$\frac{3,4...3,5}{2,8...3,4}$	$\frac{0,3}{0,4}$	$\frac{0,4}{0,8}$	7,1

ни і «чобіток» довжиною 50 і шириною 20 мм з поверхні шва. Для зварювання застосовувалися: стандартний зварювальний ТІГ пальник з діаметром сопла 16 мм, витратою захисного газу (аргону) в сопло – 7...8 л/хв, у «чобіток» – 4...5 л/хв, на піддув – 5...6 л/хв; зварювальний електрод діаметром 2,1 мм марки WT20 (зі сплаву W – 2 % ThO₂). Для проведення експериментів із зварювання застосовували безкисневий галогенідний активатор ПАТІГ-Т. Режими зварювання (табл. 1) вибирали виходячи з необхідності забезпечення стабільного якісного проплавлення зразків, що зварюються.

Активатор у вигляді пасти наносився пензликом тонким рівномірним шаром на лицьову поверхню деталі, що зварюється, шириною по 8...10 мм на кожную сторону від зварюваного стику або на діаметрі ≈ 20 мм у місці постановки точки при напустковому з'єднанні. Товщину шару активатора визначали виходячи з необхідності отримання необхідної глибини проплавлення та стабільності процесу. При цьому враховувалося, що для певних областей значень зварювального струму існує оптимальна товщина шару активатора, при якій досягається максимальна глибина проплавлення при якісному формуванні шва. Надмірна товщина шару активатора, особливо на стикових з'єднаннях, призводить до небажаних результатів – порушення стабільності процесу, зашлакування вольфрамового електрода.

Як уже зазначалося, у виробничих умовах часто отримують неякісні зварні з'єднання через необхідність зміни тепловкладання та тепловідведення по довжині стику внаслідок зносу технологічного складально-зварювального оснащення, невдалої конструкції зварного з'єднання, неточності виготовлення вузлів, що зварюються, неточності ведення дуги по стику тощо. Враховуючи те, що наявність активатора змінює характер тепловкладання та проплавлення металу, що зварюється, а внаслідок чого стабілізує процес формування шва, були проведені експерименти з визначення наскільки застосування активаторів знижує вплив зазначених вище негативних факторів.

Змінне тепловідведення створювалося застосуванням складових по довжині зразка підкладок з теплопровідністю і теплоємністю матеріалів, що сильно відрізняються: титан–мідь–титан (рис. 5, а). Режими та умови зварювання вибирали

аналогічно описаним раніше. Швидкість зварювання при цьому дещо знизили (до 100 мм/хв), а струм підвищили (до 65 і 45 А при зварюванні з різним тепловідведенням), щоб посилити вплив тепловідведення. Крім того, для зміни умов тепловідведення тепловідвідні притиски розташовували на різній (2 та 3 мм) відстані від осі шва. Режими зварювання та результати дослідження зведені в табл. 2 та рис. 5.

У виробничих умовах при складанні напусткових з'єднань обичайок великих діаметрів часто мають місце зазори між ними, що призводить до значних труднощів отримання якісних з'єднань. Крім того, для здійснення сплавлення відповідно до технологічного процесу верхній лист засвердлюють, а потім заплавляють отвір ТІГ зварюванням в камері, що значно збільшує трудо-, метало- та енергоємність виробництва.

Враховуючи значне підвищення проплавляючої здатності дуги та зменшення перегріву зварюваного металу при використанні А-ТІГ зварювання були проведені експерименти для з'ясування можливості усунення зазначених труднощів та недоліків. Основні дослідження виконували на пластинах зі сплаву ВТ-20 завтовшки 2 мм, а також сплаву ОТ-4 завтовшки 1 мм, накладених один на одного. Контрольні експерименти виконували на зразках, що імітують реальні зварні з'єднання: пластина зі сплаву ВТ-20 завтовшки 1,5 мм накладена на пластину зі сплаву ОТ-4-1 завтовшки 1,2 мм і навпаки. Зазори між пластинами задавали смужками фольги завтовшки 0,2; 0,5; 0,8; 1 мм між пластинами. Зразки збиралися прихватками по кутам пластин. Струм і час зварювання вибиралися з умов отримання повного проплавлення нижнього листа, при мінімально можливому діаметрі крапки та просіданні металу. Інші умови зварювання такі ж, як і при виконанні стикових з'єднань.

Результати досліджень. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що у цілому при застосуванні А-ТІГ зварювання стикових з'єднань:

– зменшується ширина шва в 2...3 рази при одночасному зменшенні струму зварювання на 30...50 %;

– зменшується вплив тепловідведення, якщо судити по ширині шва з його поверхні, в 5...7 разів, а з кореня шва – в 9...12 разів.

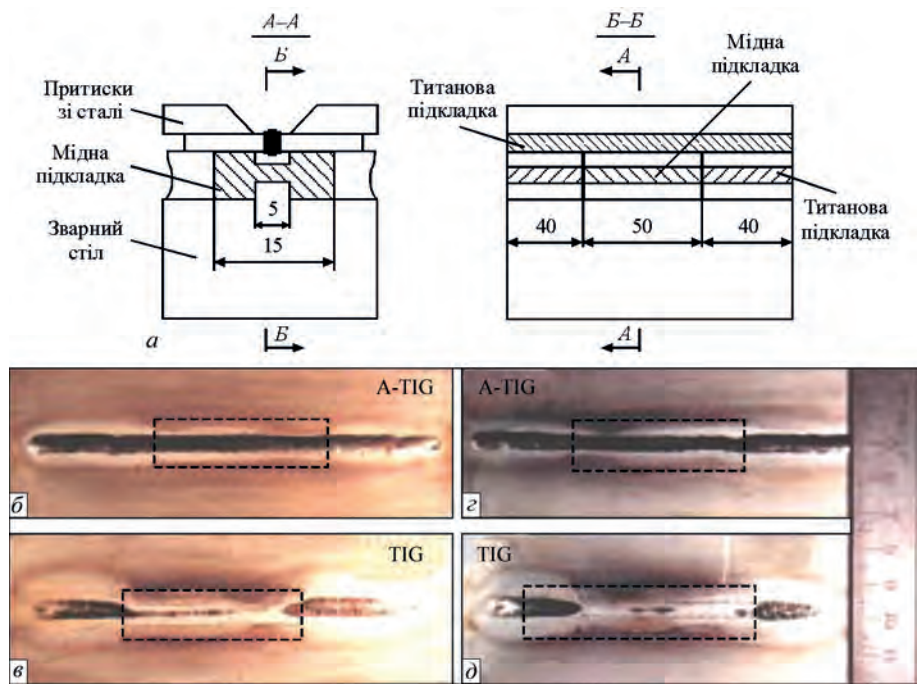


Рис. 5. Схема складання (а) та зовнішні вигляди зразків після зварювання сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм при повному проплавленні з боку коріня шва з тепловідведенням, що змінюється по довжині зразка: А-TIG зварювання (б, с); TIG зварювання (в, д); з меншим тепловідводом (б, в); з більшим тепловідводом (с, д). Пунктиром на рис. 5, б–д позначено місце розміщення мідної підкладки

Таблиця 2. Режими зварювання та результати дослідження стабільності формування швів стикових з’єднань зі сплаву Вт-20 завтовшки $\delta = 2$ мм при перемінному тепловідведенні (т/від) (див. рис. 5)

Номер зразка	Умови зварювання	Напруга на дузі U_d , В	$I_{зв}$, А	$V_{зв}$, мм/хв	Ширина шва, мм поверхня/корінь	Змінювання ширини шва поверхня/корінь	Примітка
TIG зварювання							
1-1	Без т/від	8,2...8,4	65	100	9,0...8,6 5,3...5,7		
1-2	Ti-Cu-Ti 3 т/від, відстань - 2 мм	-«-	-«-		7,8...7,2 0...1,2	<u>1,2...1,4</u> 5,3...4,5	Рис. 5, д
1-3	Ti-Cu-Ti 3 т/від, відстань - 3 мм	-«-	-«-		7,5...7,6 0...1,3	1,5...1,0 5,3...4,4	Рис. 5, в
А-TIG зварювання							
2-1	Без т/від	8,2...8,4	40	100	2,8 5,5...5,4		
2-2	Ti-Cu-Ti 3 т/від, відстань - 2 мм	-«-	-«-		2,6 5,0...4,9	0,2 0,5	Рис. 5, с
2-3	Ti-Cu-Ti 3 т/від, відстань - 3 мм	-«-	-«-		2,6 5,1	0,2 0,4...0,3	Рис. 5, б

Аналогічні результати отримані при зварюванні стикових з’єднань зразка-імітатора (завтовшки $\delta = 2$ мм) зі сплаву ВТ-20 – обичайки з вікнами. Режими зварювання та результати дослідження зведені в табл. 3 та рис. 6, 7. Застосування А-TIG зварювання дозволяє уникнути підплавлення металу в місці вікна.

Аналіз результатів металографічних досліджень показує, що позитивний вплив активатора проявляється у зменшенні ширини шва, значному зменшенні ЗТВ (рис. 8), а також у подрібненні як первинних β -зерен, так і α - та α' -пластин (рис. 9). Позитивний вплив застосування активатора при А-TIG зварюванні стикових з’єднань при зміні

Таблиця 3. Режими зварювання та результати дослідження при зварюванні зразка-імітатора – обичайки з вікнами зі сплаву ВТ-20 завтовшки δ = 2 мм (див. рис. 6)

Номер зразка	Умови зварювання Тип з'єднання	U_d , В	$I_{зв}$, А	$V_{зв}$, мм/хв	Ширина шва, мм поверхня/корінь	Примітка
		TIG зварювання				
1	Пластина, 2 шви поруч	8	100	200	$\frac{7,5...7,9}{3,2...4,6}$	Рис. 3 знизу
		А-TIG зварювання				
2		10,5	50	200	$\frac{2,2...3,2}{2,4...3,2}$	Рис. 3 зверху
		А-TIG зварювання				
1	Стик з «вікном»	10,5	60	200	$\frac{3,5...3,6}{4,3...4,7}$	Рис. 6, <i>г</i>
		А-TIG зварювання				
2		10,5	50	200	$\frac{3,6...3,7}{4,0...4,1}$	Рис. 7, <i>б</i>
		TIG зварювання				
1	Стик з «вікном»	8	100	200	$\frac{7,6}{3,8}$	Рис. 6, <i>б</i> , 7, <i>а</i>
		TIG зварювання				
2		8	110	12	$\frac{8,5}{6,0}$	Рис. 6, <i>в</i>

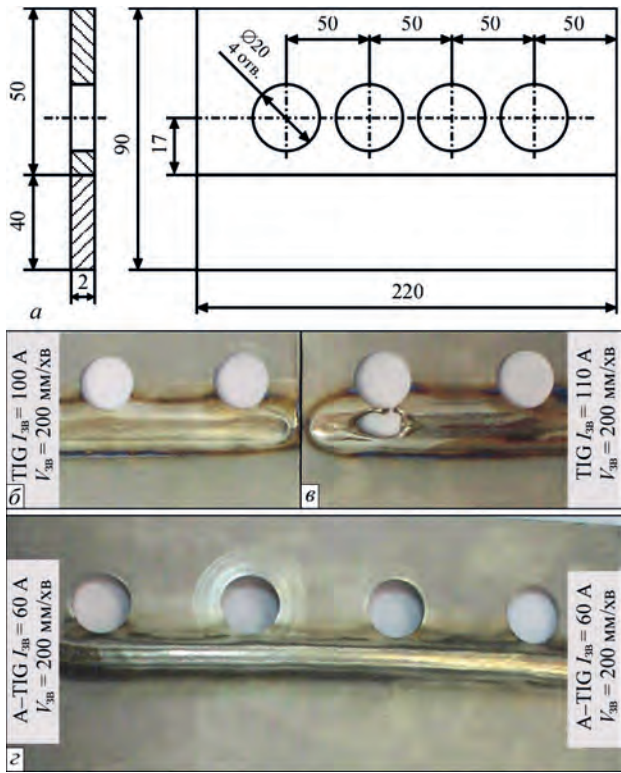


Рис. 6. Зовнішній вигляд фрагментів зварних зразків-імітаторів зі сплаву ВТ-20 завтовшки δ = 2 мм при повному проплавленні: схема підготовки зразка-імітатора (а); TIG зварювання, струм зварювання – 100 А (б) та 110 А (в); A-TIG зварювання, струм зварювання – 60 А (г)

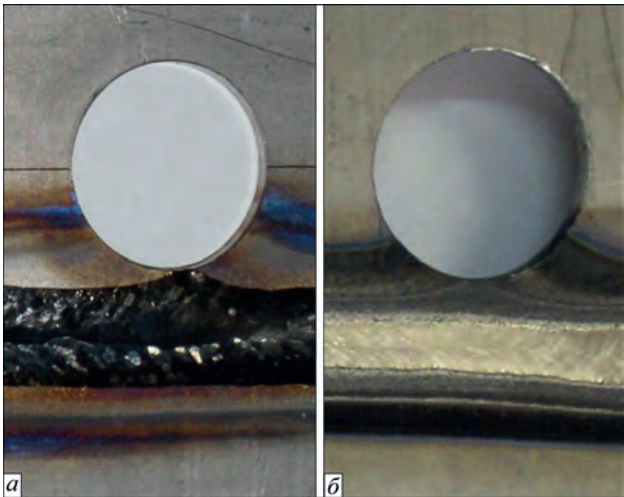


Рис. 7. Зовнішній вигляд фрагментів зварних зразків-імітаторів зі сплаву ВТ-20 завтовшки δ = 2 мм при повному проплавленні: а – TIG зварювання, струм зварювання – 100 А; б – A-TIG зварювання, струм зварювання 50 А

тепловідведення по довжині зразка чітко видно в порівнянні рис. 5, б, г та 5, в, д. A-TIG шов стабільний по ширині вздовж всієї довжини зразка, а у TIG шва зникає проплавлення у місці знаходження підкладки.

З результатів експериментів, представлених у табл. 4, 5 видно, що навіть при складанні напусткових з'єднань без зазору не вдається отримати без активатора зварної точки з проваром нижнього листа

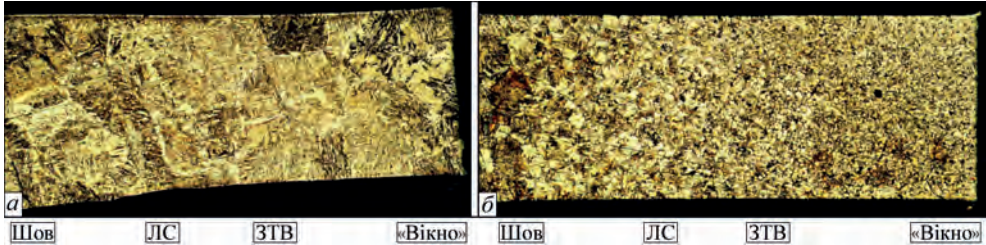


Рис. 8. Макроструктура (×25) зварних з'єднань сплаву титану ВТ-20: а – TIG зварювання; б – A-TIG зварювання, ЛС – лінія сплавлення, ЗТВ – зона термічного впливу

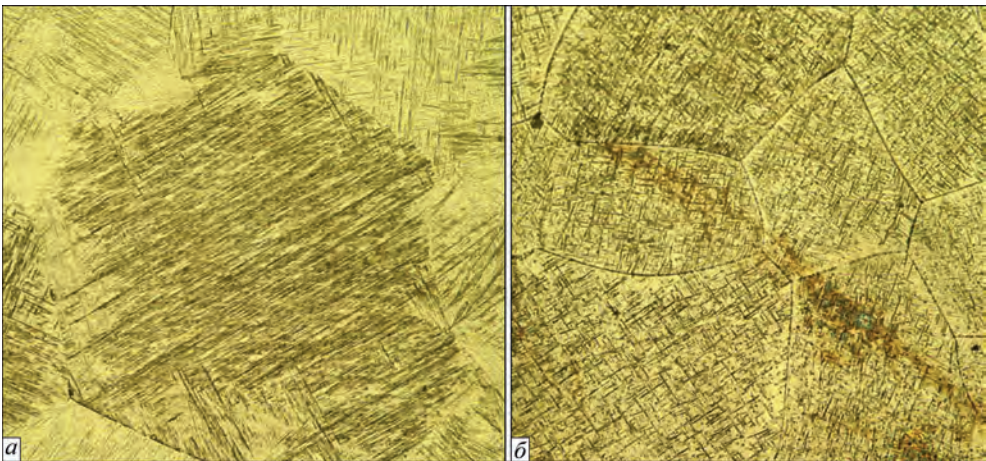


Рис. 9. Мікроструктура (×100) металу зварних швів (сплав ВТ-20): а – ТІГ шов; б – А-ТІГ шов

– формуються точки великого діаметра без наскрізного проплавлення. Значне збільшення струму або часу зварювання призводить до надмірного збільшення діаметра точки і пропалювання обох листів.

Застосування А-ТІГ зварювання дозволяє при менших значеннях струму зварювання отримати

наскрізний провар при невеликих (у межах ТУ) діаметрах точок (табл. 4, 5; рис. 10–12) та дотримання всіх вимог до подібних сполук. Збільшення проміжку викликає необхідність збільшення струму і часу зварювання, застосування присадки, оскільки при зазорах більш ніж 0,5 мм ослаблення

Таблиця 4. Режими зварювання та характеристики точкових напусткових швів на зразках Вт20 (δ = 2 + 2 мм) та ОТ-4 (δ = 1 + 1 мм), без зазору

Номер зразка	Умови зварювання	$I_{зв}, A$	Час зварювання $t_{зв}, c$	Діаметр точки, поверхня/корінь, мм	Примітка	
1-0	Вт20 (2+2 мм) А-TIG зварювання	80	10	5,0/8,5	Ослаблення шва 0,1 мм	
			5	5,0/5,0	Ослаблення шва 0,2 мм	
2-0	ОТ-4 (1+1 мм) TIG зварювання	40	10	5,5/0	Непровар, посилення шва 0,2 мм	
			5	5,0/0	Непровар, посилення шва 0,1 мм	
	А-TIG зварювання		10	6,0/6,5	Ослаблення шва 0,2 мм	
			5	3,6/2,5	Ослаблення шва 0,1 мм	

Таблиця 5. Режими зварювання та характеристики точкових напусткових швів на зразках ВТ-20, δ = 1,5 мм + ОТ-4-1, δ = 1,2 мм із різними зазорами

Номер зразка	Умови зварювання (зазор між пластинами, що зварюються, мм)	$I_{зв}$, А	$t_{зв}$, с	Діаметр точки, поверхня/корінь, мм	Примітка
TIG зварювання					
1-1	Без зазору	50	4	7,5/0	Непровар
1-2		50	10	11/0	
1-3		75	5	9,5/0	
A-TIG зварювання					
1-4	Без зазору	40	4	4,1/2,6	Ослаблення 0,2 мм
1-5		50	4	4,1/6,0	
TIG зварювання					
2-1	0,25	70	4	12,0/0	Непровар
A-TIG зварювання					
2-2	0,25	50	3	4,0/5,2	
3-1	0,5	45	6	5,8/5,8	Ослаблення 0,3 мм
3-2		60	6	8,2/6,2	Ослаблення 0,4 мм
4-1	1,0	50	4	7,5/0	Непровар
4-2		60	5	6,0/4,7	Ослаблення 0,8 мм
4-3		60	6	8,0/8,5	Ослаблення 1,0 мм

шва перевищує допустимі (0,2...0,3 мм) значення. Слід зазначити, що значне збільшення струму зварювання призводить до надмірного зростання діаметра і до ослаблення шва в кореневій його части-

ні, а збільшення часу зварювання до відповідної зміни в лицьовій частині шва (рис. 12).

Механічні властивості стикових з'єднань оцінювали за в'язкістю, оскільки ця характеристика більш чутлива до технологічних та інших факторів і більш показова, ніж, скажімо, межа міцності. Випробовували плоскі зразки типу МІ-49 ГОСТ 9454-78 завтовшки 2 мм з круглим надрізом, виконаним по різних ділянках зварного з'єднання.

З результатів, представлених у табл. 6, можна зробити висновок, що застосування активаторів у

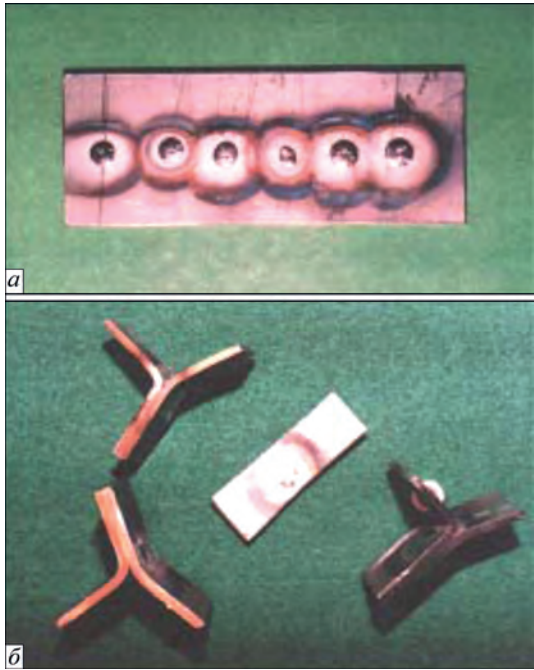


Рис. 10. Зовнішній вигляд точкових напусткових зварних з'єднань зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2 + 2$ мм: зворотня сторона з'єднання (корінь шва) (а); зразки після випробування на вигин (б)

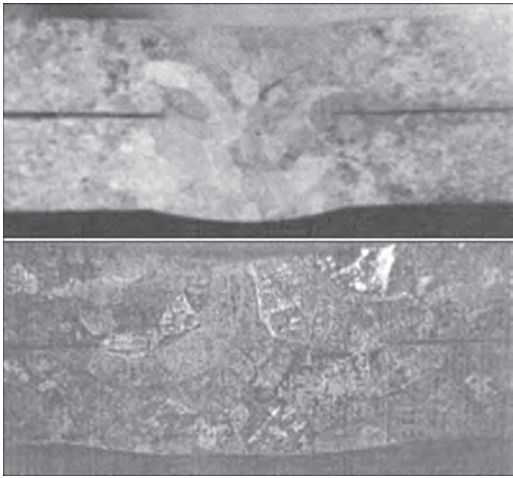


Рис. 11. Макроструктури поперечних перерізів точкових напусткових зварних з'єднань зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2 + 2$ мм, виконаних А-ТІГ зварюванням без зазору

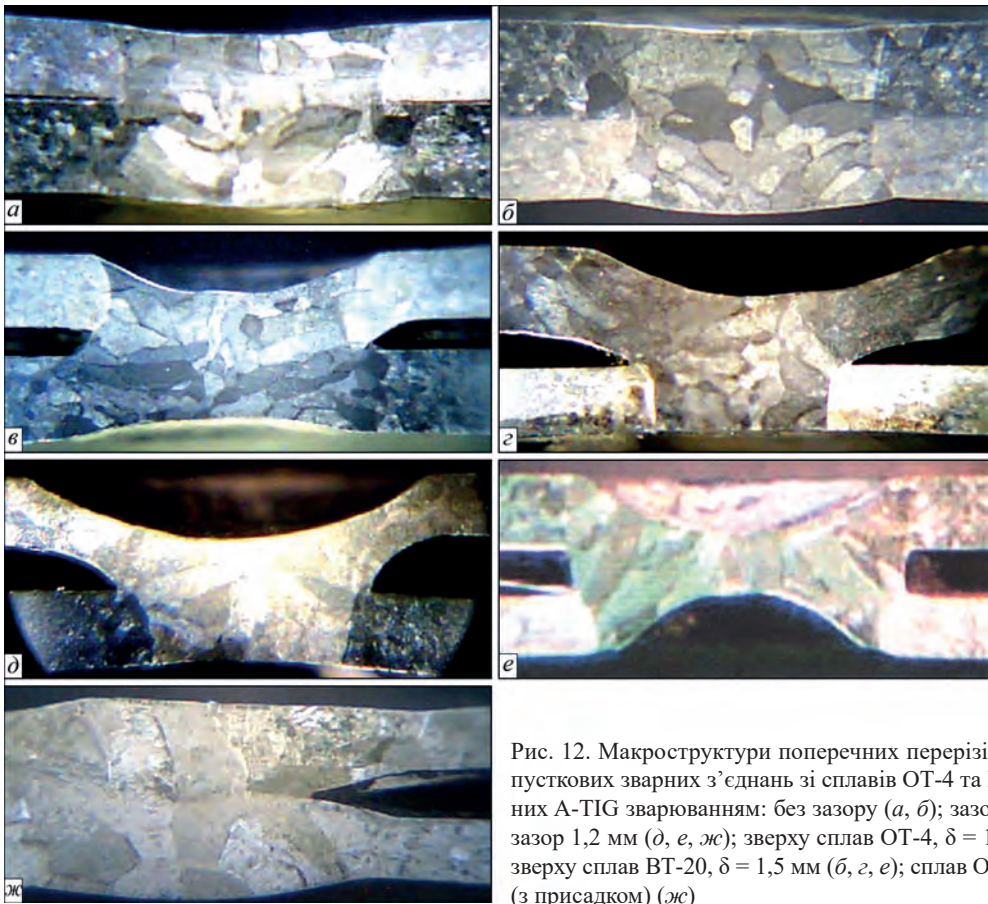


Рис. 12. Макроструктури поперечних перерізів точкових напусткових зварних з'єднань зі сплавів ОТ-4 та ВТ-20, виконаних А-ТІГ зварюванням: без зазору (а, б); зазор 0,5 мм (в, г); зазор 1,2 мм (д, е, ж); зверху сплав ОТ-4, $\delta = 1,2$ мм (а, в, д); зверху сплав ВТ-20, $\delta = 1,5$ мм (б, г, е); сплав ОТ-4, $\delta = 1,2$ мм (з присадком) (ж)

Таблиця 6. Механічні властивості стикових зварних з’єднань зі сплаву Вт-20 ($\delta = 2$ мм)

Номер п/п	Ділянка зварного з’єднання	Ударна в’язкість, Дж/см ²	Розкид значень, %
1	Основний метал	54,0...59,5/57,2	10
TIG зварювання			
2	ЗТВ	68,7...77,4/72,7	12,5
	ЛС – Шов	62,9...71,3/66,75	13,5
	Шов	69,9...87,5/78,5	25,0
А-TIG зварювання			
3	ЛС – Шов	57,9...63,3/61,0	9,2
	Шов	68,9...73,4/71,0	6,5

Таблиця 7. Властивості точкових напусткових зварних з’єднань зі сплаву Вт20 ($\delta = 2 + 2$ мм), отриманих А-TIG зварюванням

Номер п/п	Якість збирання	Руйнівні зусилля P , кгс	Напруження зрізу $\tau_{\text{ср}}^*$, МПа	Діаметр зварної точки в місці руйнування, мм	Кут загину (випробування на ударний загин), град
1	Без зазору	1022,0	507	4,6	85
		1133,2	602	5,2	96
2	Зазор 1 мм	17289	467	6,8	98
		1558,6	541	5,9	95

*Вираз умовний, при руйнуванні має місце вирив точки, а не зріз.

більшості випадків незначно змінює властивості зварного металу.

Слід зазначити, що додатковий низькотемпературний відпал (650 °С, 30 хв) призводить до вирівнювання властивостей до значень основного металу.

Властивості точкових напусткових зварних з’єднань оцінювали як за результатами випробувань зразків МІ-25 (2 + 2 мм) тип ХХ за ГОСТ 6996-66 – на зріз, так і технологічної проби на ударний вигин. Результати випробувань представлені у табл. 7. Руйнування відбувається по основному металу (у деяких випадках – по ЗТВ) при значеннях навантаження і кутах загину більших, ніж обумовлено ТУ на виробі і ГОСТом.

Висновки

- 1. Позитивний ефект від застосування А-TIG зварювання тонколистових (1...2 мм) титанових сплавів полягає у зменшенні розмірів шва та ЗТВ, у меншому перегріві зварюваного металу і, як наслідок – деякому зниженні зварювальних напруг та деформацій, зменшенні чутливості до нерівномірного тепловідводу від зони зварювання і до різновисновинності елементів, що зварюються.
- 2. Застосування способу А-TIG зварювання для точкових напусткових з’єднань дозволяє отримувати якісні з’єднання без засвердлювання верхнього елемента зварного з’єднання при знижених струмах зварювання, а застосовуючи TIG зварювання такі з’єднання неможливо отримати. Крім того, виконуючі А-TIG зварювання, стає можливим отримання з’єднань при порушеннях складан-

ня – зазорах між листами, що зварюються, які можуть досягати товщини верхнього елемента.

3. Результати виконаних досліджень дозволяють рекомендувати при створенні конструкцій складної геометрії з титанових сплавів малих товщин спосіб А-TIG зварювання з використанням запропонованого активатора ПАТІГ-Т.

Список літератури/References

- 1. Ющенко К.А., Коваленко Д.В., Коваленко І.В. (2001) Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым электродом в инертных газах (А-TIG) сталей и сплавов. *Автоматическая сварка*, 7, 37–43.
- Yushchenko, K.A., Kovalenko, D.V., Kovalenko, I.V. (2001) Application of activators for TIG welding of steels and alloys, 7, 37–43.
- 2. Lucas, W., Howse, D. (1996) Activating flux – increase the performance and productivity of the TIG and plasma processes. *Welding and Metal Fabrication*, 1, 11–17.
- 3. Lucas, W. (2000) Activating Flux – Improving the performance of the TIG process. *Welding and Metal Fabrication*, 2, 7–10.
- 4. Dong, C., Katayama, S. (2004) *Basic understanding of A-TIG welding process*. IIW Doc.1802-04/Doc.212-1055-04
- 5. Paton, B.E., Yushchenko, K.A., Kovalenko, D.V. et al. (2006) *Factors of increased penetrating capacity of A-TIG welding of stainless steel*. IIW Doc.XII-1911-06, 17–29.
- 6. Yushchenko, K.A., Kovalenko, D.V., Krivtsun, I.V. et al. (2008) *Experimental studies and mathematical modelling of metal penetration in TIG and A-TIG stationary arc welding*. IIW Doc.212-1117-08.
- 7. Ющенко К.А., Коваленко Д.В. и др. (2000) А-TIG сварка никелевого сплава НИМОНІК-75. *Сварщик*, 14, 4, 26–27.
- Yushchenko, K.A., Kovalenko, I.V. Kovalenko, D.V. et al. (2000) A-TIG welding of nickel alloy NIMONIC-75. *Svarshchik*, 14(4), 26–27.
- 8. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блещук В.Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова думка.

- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
9. Perry, N., Marya, S., Soutif, E. (1999) New perspectives of flux assisted GTA welding in titanium structures. *Reactive Metals in Corrosive Applications Conference Proceedings*, Jack Tosdale, Editor, Wah Chang, 55–62.
 10. Патон Б.Е., Замков В.Н., Прилуцкий В.П. и др. (2000) Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне. *Автоматическая сварка*, 1, 1–8.
Paton, B.E., Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. et al. (2000) Contraction of the welding arc caused by the flux in tungsten-electrode argon-arc welding. *The Paton Welding J.*, 1, 1–8.
 11. Замков В.Н., Прилуцкий В.П. (2004) Теория и практика TIG-F сварки (A-TIG) (Обзор). *Автоматическая сварка*, 9, 12–15.
 - Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. (2004) Theory and practice of TIG-F (A-TIG) welding (Review). *The Paton Welding J.*, 9, 11–14.
 12. Sun, Z., Pan, D. (2004) Welding of titanium alloys with activating flux. *Science and Technology of Welding and Joining*, 9, 4, 337–344.
 13. Leconte, S., Pillard, P., Chaelle, P. et al. (2007) Effect of flux containing fluorides on TIG welding process. *Ibid*, 12, 2, 120–126.
 14. Niagaj, J. (2012) Peculiarities of A-TIG welding of titanium and its alloys. *Archives of metallurgy and materials*, 57, 1, 39–44.
 15. Prilutsky, V.P., Akhonin, S.V. (2014) TIG welding of titanium alloys using fluxes. *Welding in the World*, 58, 245–251.

APPLICATION OF A-TIG WELDING FOR IMPROVING THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING AND REPAIR OF UNITS OF GAS TURBINE ENGINES AND INSTALLATIONS FROM TITANIUM ALLOYS

D.V. Kovalenko, I.V. Kovalenko, B.O. Zaderii, G.V. Zvyagintseva

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

The advantages of using the technology of A-TIG welding (TIG welding along the layer of activating flux – activator) of structurally complex elements of titanium alloys, including butt and spot overlapped joints of various thicknesses, as well as joints with variable heat dissipation, are shown. The relationship between the geometry of welds, structure and properties of welded joints produced by TIG and A-TIG welding methods was studied. A-TIG welding technology was tested in industrial conditions during creation and repair of problematic units of aircraft and convertible gas turbine engines. The A-TIG welding method is recommended for industrial implementation when creating welding structures from titanium alloys of a complex geometry. 15 Ref., 7 Tabl., 12 Fig.

Keywords: TIG and A-TIG welding, activators, titanium alloys, butt and spot overlapped joints, variable heat dissipation, weld formation, structure and properties

Надійшла до редакції 29.07.2022



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

LET'S JOIN
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1 IN THE WORLD

ВПЛИВ КОНФІГУРАЦІЇ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ

О.Д. Размишляєв¹, С.Ю. Максимов², О.М. Берднікова², О.О. Прилипко², О.С. Кушнарьова²,
Т.О. Алексєнко²

¹ДВНЗ «ПДТУ». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: office@psty.edu

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

Досліджено особливості структури металу зварних з'єднань конструкційної низьколегованої сталі після зварювання із застосуванням зовнішнього електромагнітного поля. Вивчено фазовий склад, мікроструктуру та мікротвердість металу зварних з'єднань, отриманих без та із застосуванням знакозмінних магнітних полів – поздовжнього або поперечного. Проаналізовано структурні параметри в металі швів та ділянках зони термічного впливу. Встановлено умови одержання якісних зварних з'єднань під час зварювання низьколегованих сталей під впливом зовнішнього електромагнітного поля, які забезпечують зміцнення та тріщиностійкість металу. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: конструкційна низьколегована сталь, зварні з'єднання, зовнішній електромагнітний вплив, знакозмінні магнітні поля, зона термічного впливу, фазовий склад, мікроструктура, мікротвердість

Вступ. Вимоги до якості й надійності зварних з'єднань постійно зростають. Потреба в розширенні асортименту сталей при зварюванні привели до розвитку наукового напрямку щодо використання зовнішнього електромагнітного впливу (ЗЕВ) на розплави зварювальної ванни для інтенсифікації процесів його дегазації, зниження вмісту водню, подрібнення структури, підвищення значень показників міцності й пластичності швів. У результаті експериментальних досліджень показана справедливність теоретичних висновків про ефективність ЗЕВ для зниження схильності металу швів до утворення пор, а механізм дегазації, сформований під впливом ЗЕВ, сприяє досягненню високого ступеня однорідності дрібнопористості. Для його уточнення потрібно визначати характер розподілу ліній електричного струму в зварювальній ванні з урахуванням умов зварювання. На основі цього стає можливим визначення оптимальних параметрів ЗЕВ і виконання розрахунків індуктора. Останній повинен бути виконаний таким чином, щоб створити магнітну індукцію саме в активній частині зварювальної ванни, тобто області, в якій відбувається ефективна взаємодія електричного струму і зовнішнього електромагнітного поля, що викликає переміщення розплаву [1–3].

Розв'язання актуальної проблеми підвищення ефективності процесу дугового наплавлення і зварювання плавким електродом з дією керуючих магнітних полів дозволить підвищити продуктивність процесу розплавлення електродного дроту, ефективність керування глибиною та шириною зварних

швів та наплавлених валиків, ефективність перемішування рідкого металу зварювальної ванни.

При дуговому зварюванні застосовують поздовжні магнітні (ПДМП) і поперечні магнітні поля (ПОМП). У перших вектор індукції паралельний, у других – перпендикулярний до осі електрода та дуги [3, 4].

Розрахунками визначено значення швидкості й прискорення, які досягає рідкий метал під дією знакозмінного ЗЕВ, а також оптимальні значення індукції та частоти ПДМП, ПОМП, що забезпечують ефективне перемішування розплаву по всій довжині ванни при електродуговому наплавленні [5–10]. Проте невідомо про вплив ПДМП і ПОМП на структуру, що при цьому формується в металі зварних швів та у зоні термічного впливу (ЗТВ).

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу знакозмінного ЗЕВ (ПДМП, ПОМП) на структурно-фазовий склад, мікротвердість та мікроструктуру зварних з'єднань конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С.

Матеріал та методи. В результаті зварювання конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С (товщиною 14 мм) присадковим дротом Св-08А (діаметром 3 мм) (флюс АН-348) отримано зварні з'єднання без та із застосуванням ЗЕВ на режимах зварювання: струм $I = 360$ А; напруга на дузі $U = 30 \dots 32$ В; швидкість зварювання $v = 30$ м/год, зворотна полярність, на флюсомідній підкладці. Тип з'єднання С4 (ГОСТ 8713–78).

ЗЕВ здійснювали індуктором, розміщеним на тримачі механізму, який подавав порошковий дріт,

Максимов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>, Берднікова О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>,
Прилипко О.О. – <https://orcid.org/0000-0001-5244-5624>, Кушнарьова О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795>,
Алексєнко Т.О. – <https://orcid.org/0000-0001-8492-753X>

© О.Д. Размишляєв, С.Ю. Максимов, О.М. Берднікова, О.О. Прилипко, О.С. Кушнарьова, Т.О. Алексєнко, 2022

співвісно з ним. Живлячись змінним струмом промислової частоти, індуктор створював змінне магнітне поле, яке пронизувало зварювальну ванну рідкого металу. Магнітна індукція в зоні зварювальної ванни становила 20...25 мТл. Отримано три варіанти зварних з'єднань: без застосування ЗЕВ; із застосуванням ПДМП ($f=2$ Гц) та ПОМП ($f=6$ Гц).

Дослідження мікроструктури проводили методами світлової мікроскопії (мікроскопи «Neophot-32» і «Versamet-2», Японія). Твердість за Віккерсом вимірювали на твердомірі М-400 (фірми «Лесо», США) при навантаженні 0,1 кг.

Результати та їх обговорення. У зварних з'єднаннях досліджено основний метал (ОМ), метал швів, лінію сплавлення (ЛС), ЗТВ по ділянках: I – перегріву (великого зерна); II – нормалізації (повної перекристалізації); III – неповної перекристалізації; IV – рекристалізації. Вивчали структури фериту Φ , перліту П, розміри зерен D_3 , ширину кристалітів $h_{кр}$, товщину феритних прошарків $\delta(\Phi)$ та мікротвердість HV .

Встановлено, що ПДМП і ПОМП мають вплив на розміри ділянок ЗТВ (таблиця). У досліджуваних зварних з'єднаннях при застосуванні ЗЕВ ширина ділянок ЗТВ збільшується (таблиця), що пов'язано із характером руху рідкого металу в зварювальній ванні під дією ЗЕВ, особливостями нагрівання та охолодження металу.

Ширина (мкм) ділянок ЗТВ зварних з'єднань

Ділянки ЗТВ	Зварні з'єднання		
	Без ЗЕВ	ПДМП	ПОМП
I	1000...1600	1000...1600	1600...2200
II	1000	1200	1600
III	600	1000	1400
IV	600	800	1000

Структура ОМ сталі 09Г2С феритно-перлітна при $D_3(\Phi) = 10...20$ мкм, $D_3(П) = 40...80$ мкм і $HV = 1650...1760$ (рис. 1, а). Структура металу зварних швів у всіх з'єднаннях також феритно-перлітна (Φ –П) (рис. 1, б–з).

У центрі металу шва без ЗЕВ розмір (ширина) кристалітів перліту становить $h_{кр}(П) = 140...340$ мкм (рис. 1, б) при $HV(П) = 2060$ МПа, а ширина зерна фериту – $h_{кр}(\Phi) = 40...100$ мкм та $HV(\Phi) = 1810...1870$ МПа. У корені шва $h_{кр}(П)$ та $h_{кр}(\Phi)$ становлять 60...100 мкм. У ЛС, як і в корені шва, отримано невелике зниження мікротвердості порівняно з центром шва – на 130 і 110...170 МПа відповідно.

Дослідженнями зразка із застосуванням ПДМП встановлено, що ширина кристалітів Φ –П структури металу зварного шва становить: $h_{кр}(П) = 100...160$ мкм (рис. 1, в) при $HV(П) = 1990...2080$ МПа; $h_{кр}(\Phi) = 40...100$ мкм при $HV(\Phi) = 1760...1930$ МПа. У корені шва $h_{кр}(П) = 60...140$ мкм і $h_{кр}(\Phi) = 20...40$ мкм. У ЛС $h_{кр}(П) = 60...140$ мкм і $h_{кр}(\Phi) = 20...40$ мкм з невеликим зростанням мікротвердості порівняно із центром шва: $HV(П) = 1990...2280$ МПа, $HV(\Phi) = 1680...1990$ МПа. Слід зазначити, що у зварному з'єднанні із застосуванням ПДМП у зоні ЛС, тобто при переході від металу шва до I ділянки ЗТВ, утворилася велика холодна тріщина довжиною 1600 мкм (рис. 1, д).

Дослідженнями зразка із застосуванням ПОМП встановлено, що ширина кристалітів у металі зварного шва $h_{кр}(П) = 100...200$ мкм (рис. 1, з) при $HV(П) = 1930$ МПа, а ширина феритних зерен – $h_{кр}(\Phi) = 20...60$ мкм при $HV(\Phi) = 1600...1760$ МПа. У корені шва та у ЛС розмір зерна $h_{кр}(П) = 60...220$ мкм і $h_{кр}(\Phi) = 40...140$ мкм при $HV(П) = 1930...2060$ МПа, $HV(\Phi) = 1600...1760$ МПа.

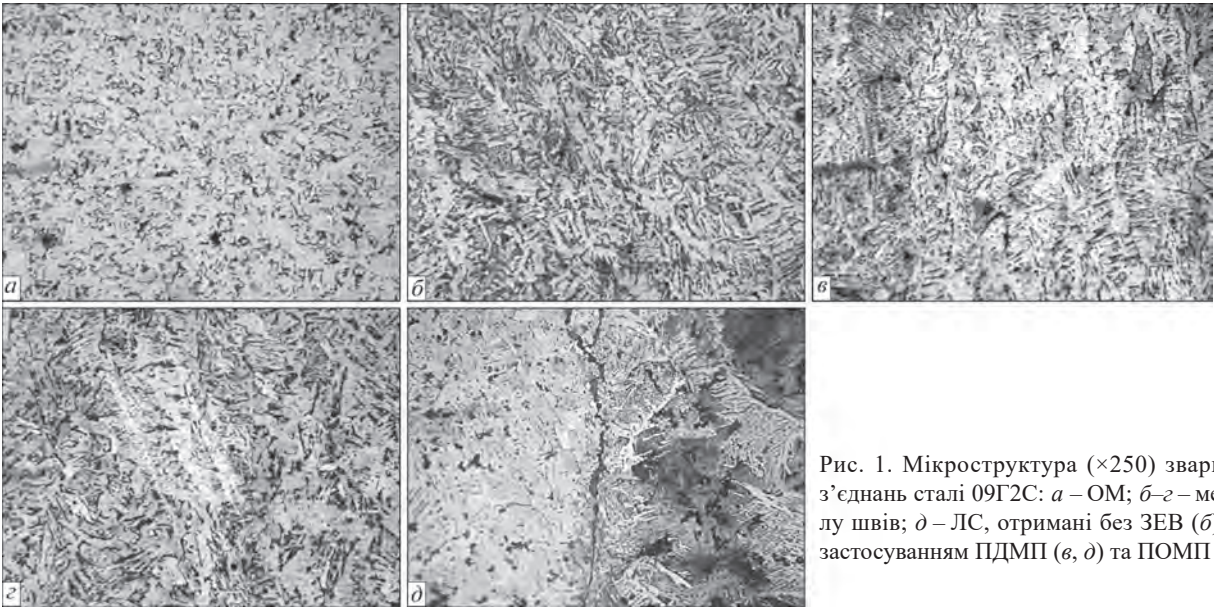


Рис. 1. Мікроструктура ($\times 250$) зварних з'єднань сталі 09Г2С: а – ОМ; б–з – металу швів; д – ЛС, отримані без ЗЕВ (б), із застосуванням ПДМП (в, д) та ПОМП (з)

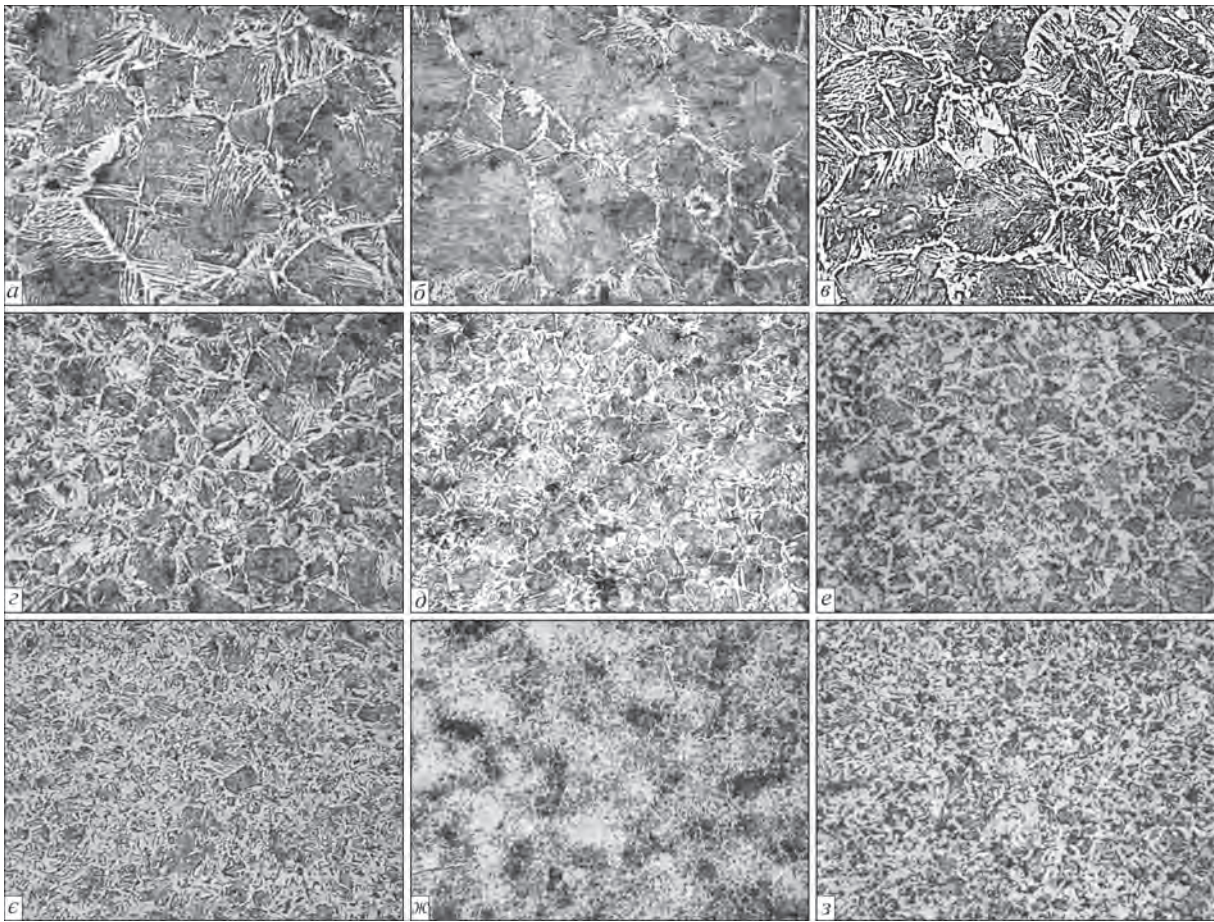


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 250$) металу ЗТВ зварних з'єднань сталі 09Г2С по ділянках: а–в – І ЗТВ; г–е – ІІ ЗТВ; ж–з – ІІІ, ІV ЗТВ, що отримані без ЗЕВ (а, г, е), із застосуванням ПДМП (б, д, ж) та ПОМП (в, е, з)

Дослідженнями ЗТВ металу зварних з'єднань (рис. 2) встановлено, що у І ділянці ЗТВ зразка без ЗЕВ перлітна структура з розміром D_3 (П) = 100...360 мкм та прошарками фериту δ (Φ) = 30...70 мкм при HV (П) = 2130...2210 МПа (рис. 2, а), HV (Φ) = 1810...1990 МПа. У ІІ ділянці ЗТВ структура подрібнюється до D_3 (Φ –П) = 30...80 мкм, мікротвердість практично не змінюється (HV (П) = 2060 МПа; HV (Φ) = 1870...1930 МПа) (рис. 2, г). У ІІІ, ІV ділянках ЗТВ D_3 (Φ –П) = 10...50 мкм при HV (Φ –П) = 1810...1930 МПа (рис. 2, е).

Дослідженнями зразка із застосуванням ПДМП встановлено, що у І ділянці ЗТВ формується П-структура з розміром D_3 (П) = 140...340 мкм та прошарками фериту δ (Φ) = 20...100 мкм при HV (П) = 2130...2210 МПа (рис. 2, б), HV (Φ) = 2060 МПа. У ІІ–ІV ділянках ЗТВ структура помітно подрібнюється до D_3 (Φ –П) = 30...100 мкм (ІІ ділянка ЗТВ, рис. 2, д), D_3 (Φ –П) = 10...40 мкм (ІІІ ділянка ЗТВ, рис. 2, ж) та D_3 (Φ –П) = 20...80 мкм (ІV ділянка ЗТВ). У ІІ ділянці ЗТВ мікротвердість практично відповідає мікротвердості у І ді-

лянці ЗТВ при подальшому її зменшенні у ІІІ, ІV ділянках ЗТВ до HV (Φ –П) = 1700...1930 МПа.

При застосуванні ПОМП у І ділянці, ЗТВ формується перлітна структура з розміром D_3 (П) = 100...280 мкм та прошарками фериту δ (Φ) = 20...50 мкм (рис. 2, в) при HV (П) = 1990...2060 МПа, HV (Φ) = 1760...1930 МПа. У ІІ ділянці ЗТВ формується дрібнозерниста структура (D_3 (Φ –П) = 20...70 мкм (рис. 2, е), мікротвердість незначно зменшується (HV (П) = 1870...1990 МПа; HV (Φ) = 1760...1810 МПа). У ІІІ, ІV ділянках ЗТВ структура подрібнюється до D_3 (Φ –П) = 10...70 мкм (рис. 2, з) при HV (Φ –П) = 1700...1870 МПа (ІІІ ділянка ЗТВ) та HV (Φ –П) = 1760...1930 МПа (ІV ділянка ЗТВ) при HV (Φ –П) = 1810...1930 МПа.

Зіставленням параметрів HV (рис. 3) та мікроструктури (рис. 4) досліджуваних зразків встановлено наступне. У зразка, отриманого без ЗЕВ, спостерігається помітне підвищення HV у І та ІІ ділянках ЗТВ відносно металу шву (рис. 3, а). У зразка із застосуванням ПДМП (рис. 3, б) порівняно зі зразком без ЗЕВ біля ЛС з боку шва та у І ділянці ЗТВ спостерігається підвищення HV . При цьому градієнт ΔHV стано-

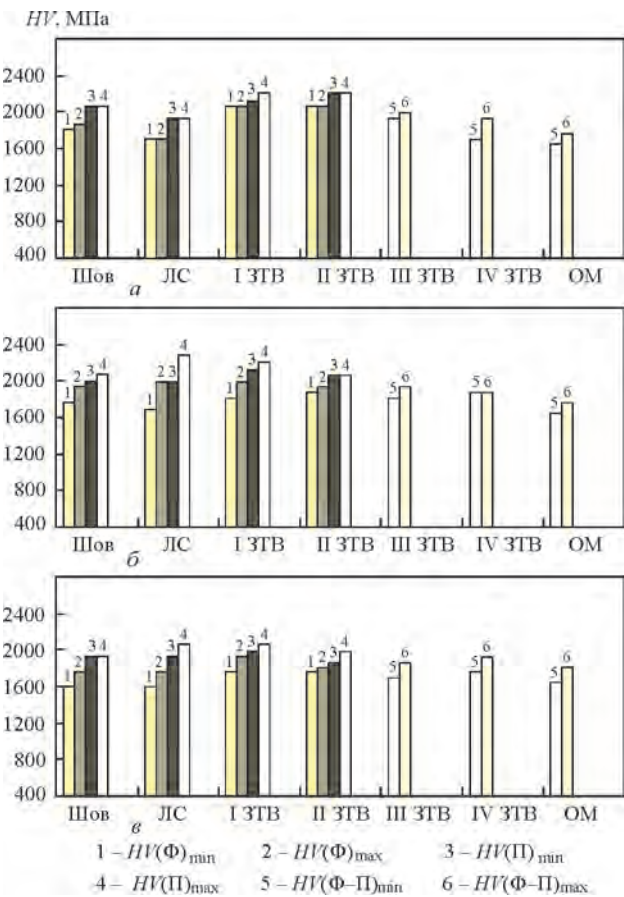


Рис. 3. Мікротвердість (HV) металу зварних з'єднань сталі 09Г2С, отриманих без ЗЕВ (а), із застосуванням ПДМП (б) та ПОМП (в)

вить до 320 МПа. Це може бути причиною тріщиноутворення з подальшим крихким руйнуванням зварного з'єднання. Найбільш рівномірний рівень HV як у металі шва, так і в ЗТВ, спостерігається у зварному з'єднанні, отриманому із застосуванням ПОМП (рис. 3, в).

При застосуванні ПДМП і ПОМП у зварних з'єднаннях порівняно із зразком без ЗЕВ у металі швів поблизу ЛС зеренна структура незначно укрупнюється (рис. 4). При переході до ЗТВ відбувається подрібнення структури, незначне – при застосуванні ПДМП та більше при ПОМП. При цьому ширина прошарків фериту при ПОМП зменшується в середньому в 1,4 та 1,7 раза порівняно зі зразками без ЗЕВ та ПДМП. Також при застосуванні ПОМП у I та II ділянках ЗТВ зерно подрібнюється в середньому в 1,3 раза порівняно зі зразком без ЗЕВ. Таке диспергування структури буде забезпечувати як міцність, так і підвищувати в'язкість руйнування металу та відповідно тріщиностійкість зварного з'єднання. Слід також зазначити, що вплив ЗЕВ на структурні зміни найбільш помітний у таких локальних ділянках зварних з'єднань, як ЛС та I, II ділянках ЗТВ.

Таким чином, встановлено, як дія ЗЕВ, зокрема ПДМП та ПОМП, впливає на розміри ЗТВ, мікро-

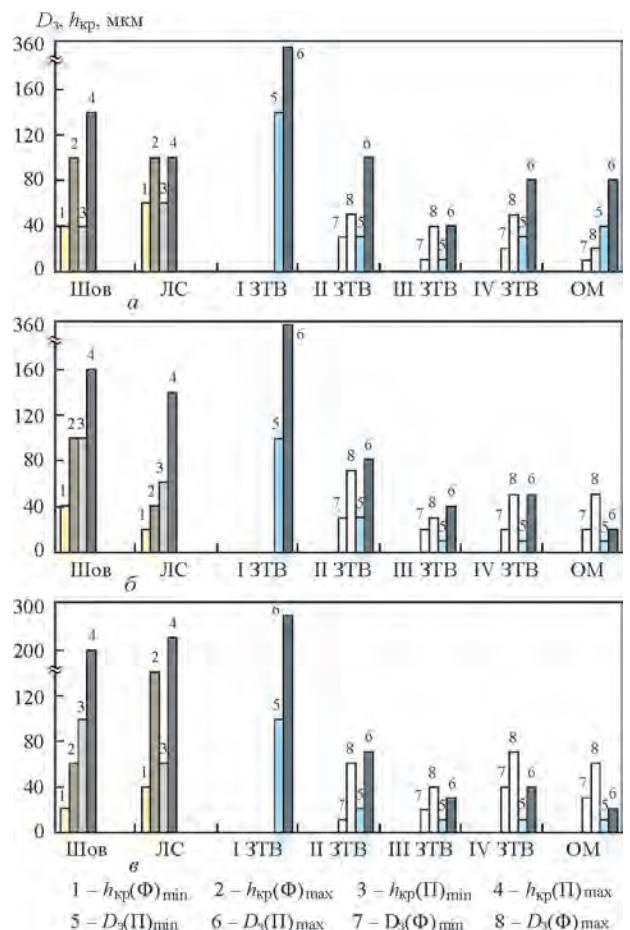


Рис. 4. Структурні параметри в металі зварних з'єднань сталі 09Г2С, отриманих без ЗЕВ (а), із застосуванням ПДМП (б) та ПОМП (в)

структуру, мікротвердість металу швів, ЗТВ, тріщиноутворення у зварних з'єднаннях низьколегованої сталі 09Г2С.

При застосуванні ПДМП у зоні ЛС формується великозерниста структура, спостерігаються градієнти мікротвердості, утворюються тріщини. Це може бути причиною подальшого крихкого руйнування зварного з'єднання.

Застосування ПОМП забезпечує подрібнення зеренної структури у ділянці перегріву (I ЗТВ) та нормалізації (II ЗТВ), рівномірний рівень мікротвердості як у металі шва, так і в ділянках ЗТВ. Такі структурні зміни будуть забезпечувати міцність та підвищувати в'язкість руйнування металу і відповідно забезпечувати тріщиностійкість зварного з'єднання.

Висновки

1. При дуговому зварюванні дія знакозмінних магнітних полів впливає на мікротвердість, параметри мікроструктури металу зварних з'єднань та розміри ЗТВ.
2. Більшою мірою дія зовнішнього електромагнітного впливу при зварюванні низьколегованої сталі спостерігається у зоні ЛС та ЗТВ впливу

на ділянках перегріву (великого зерна) і нормалізації (повної перекристалізації).

3. При застосуванні поздовжнього магнітного поля у зоні ЛС формування великозернистої структури при градієнтах за мікротвердістю призвело до тріщиноутворення. Це може бути причиною подальшого крихкого руйнування зварного з'єднання.

4. Застосування поперечного магнітного поля забезпечило формування найприйнятнішої структури металу зварного з'єднання при рівномірному рівні мікротвердості як у металі шва, так і на ділянках ЗТВ, та помітному подрібненні структури у ділянці перегріву (І ЗТВ) і нормалізації (ІІ ЗТВ). Такі структурні зміни будуть забезпечувати як міцність, так і підвищувати в'язкість руйнування металу та відповідно тріщиностійкість зварного з'єднання.

5. Найбільш ефективним при зварюванні низьколегованої сталі під дією ЗЕВ є застосування поперечних магнітних полів, у яких вектор індукції перпендикулярний до осі електрода та дуги.

Список літератури

1. Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д., Прилипко Е.А. (2005) Методика расчета параметров управляющего электромагнитного воздействия при дуговой сварке конструкционных сталей. *Вестник НТТУ «КПИ»*, **45**, 176–177.
2. Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д. (2006) Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (обзор). *Автоматическая сварка*, **10**, 36–44.
3. Кузнецов В.Д., Рыжов Р.Н. (2005) Выбор оптимальных параметров внешнего электромагнитного воздействия при дуговых способах сварки. *Там же*, **6**, 27–31.
4. Рыжов Р.Н. (2007) Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процесс формирования и кристаллизацию швов. *Сварочное производство*, **2**, 56–58.
5. Ahieieva, A.D. (2019) Rational Using of the Controlling Longitudinal and Transverse Magnetic Fields at arc Welding and Surfacing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
6. Ageeva M.V., Razmyshlyayev A.D. (2019) Влияние комбинированного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при дуговой наплавке. *Технічні науки та технології*, **18**, 4, 22–27.
7. Болдырев А.М., Биржев В.А., Черных А.В. (1992) К расчету гидродинамических параметров жидкого металла на

дне сварочной ванны при дуговой сварке. *Сварочное производство*, **2**, 31–33.

8. Болдырев А.М., Биржев В.А., Мартыненко А.И. (2008) Исследование влияния переменного аксиального магнитного поля на процесс плавления электродной проволоки. *Там же*, **2**, 6–8, 63, 64.
9. Миронова М.В. (2013) К выбору оптимальных схем устройств ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки. *Збірник наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*, **1**(21), 74–78.
10. Лазаренко М.А., Размышляев А.Д. (2000) Структура управляющих магнитных полей для процессов сварки и наплавки при использовании устройств с цилиндрической 304 симметрией. *Вісник ПДТУ: Зб. наук. пр.*, **9**, 160–163.

References

1. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D., Prilipko, E.A. (2005) Calculation procedure of controlling electromagnetic effect parameters in arc welding of structural steels. *Vestnik HTUU KPI*, **45**, 176–177 [in Russian].
2. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2006) External electromagnetic effects in the processes of arc welding and surfacing (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 36–44.
3. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2005) Choice of optimal parameters of external electromagnetic action in arc methods of welding. *The Paton Welding J.*, **6**, 27–31.
4. Ryzhov, R.N. (2007) Influence of electromagnetic actions on process of formation and solidification of welds. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 56–58 [in Russian].
5. Ahieieva, A.D. (2019) Rational using of the controlling longitudinal and transverse magnetic fields at arc welding and surfacing. *IOP Conference Series: Mater. Sci. and Engin.*
6. Ageeva, M.V., Razmyshlyayev, A.D. (2019) Influence of combined magnetic field on wire melting rate in arc surfacing. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnologii*, **18**(4), 22–27 [in Russian].
7. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1992) To calculation of hydrodynamic parameters of liquid metal on welding pool bottom in arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 31–33 [in Russian].
8. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Martynenko, A.I. (2008) Examination of influence of variable axial magnetic field on process of electrode wire melting. *Ibid.*, **2**(6–8), 63, 64 [in Russian].
9. Mironova, M.V. (2013) To choice of optimal schemes of input devices of transverse magnetic field for processes of arc welding and surfacing. In: *Zbirnyk Nauk. Prats of DSTU, Tekhnichni Nauky*, **1**(21), 74–78 [in Russian].
10. Lazarenko, M.A., Razmyshlyayev, A.D. (2000) Structure of controlling magnetic fields for welding and surfacing processes using the devices with cylindrical 304 symmetry. *Visnyk PDTU*, **9**, 160–163 [in Russian].

EFFECT OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD CONFIGURATION ON METAL STRUCTURE OF WELDED JOINTS OF STRUCTURAL STEEL

O.D. Razmyshlyayev¹, S.Yu. Maksymov², O.M. Berdnikova², O.O. Prylypko², O.S. Kushnyaryova², T.O. Alekseyenko²

¹Pryazovskyi State Technical University, 7 Universytetska Str., 87500, Mariupil, Ukraine. E-mail: office@psty.edu

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

The peculiarities of metal structure of welded joints of structural low-alloy steel after welding using external electromagnetic field were studied. The phase composition, microstructure and microhardness of metal of welded joints produced without and with the use of alternating magnetic fields – longitudinal or transverse were studied. The structural parameters in the metal of the welds and areas of the heat-affected zone were analyzed. The conditions for producing high-quality welded joints during welding of low-alloy steels under the effect of external electromagnetic field, which provide strengthening and crack resistance of the metal, were found. 10 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Key words: structural low-alloy steel, welded joints, external electromagnetic effect, alternating magnetic fields, heat-affected zone, phase composition, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 29.08.2022

ОСОБЛИВОСТІ ПОПЕРЕДНЬОГО НАГРІВУ ОПОРОМ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ОПЛАВЛЕННЯМ ТОВСТОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

К.В. Гушин¹, І.В. Зяхор¹, С.М. Самотрясов¹, М.С. Завертанний¹, А.М. Левчук¹, Wang Qichen²

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

²CIMC Offshore Engineering Institute Company Limited, Yantai, Shandong, P.R. China

Запропоновано та розрахунковим шляхом обґрунтовано технологічну концепцію контактного стикового зварювання оплавленням з попереднім нагріванням опором з використанням багаторазової проміжної вставки з матеріалу з високим електричним опором. Розрахункові та експериментальні результати свідчать про значний ефект використання проміжної вставки при нагріванні опором – суттєво підвищується температура в обох характерних точках при всіх досліджуваних значеннях щільності струму, товщини вставки і часу нагрівання. Зазначений ефект досягається шляхом інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту деталей і відповідного зменшення втрати енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: контактне стикове зварювання оплавленням, нагрівання опором, алюмінієвий сплав, математичне моделювання, температурне поле

Вступ. Ефективною технологією нерозривно-го з'єднання при виготовленні силових елементів літальних апаратів з прямолінійних (стрингери) і кільцевих (обичайки) заготовок, пресованих профілів розвиненого і компактного перерізу (шпангоути) є контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО). Цей спосіб забезпечує високу стабільну якість з'єднань, об'єднує в єдиному циклі складальні та зварювальні операції, не вимагає застосування допоміжних витратних матеріалів [1–3]. При зварюванні заготовок алюмінієвих сплавів товщиною до 12 мм технологія КСЗО забезпечує високі показники міцності та якісне (бездефектне) з'єднання при незначній ширині зони термічного впливу (ЗТВ).

При КСЗО профілів з алюмінієвих сплавів більшої товщини необхідно виконувати попереднє нагрівання заготовок опором шляхом пропускання електричного струму високої щільності з наступним розведенням заготовок і виконанням оплавлення і осадки.

Технологію КСЗО з попереднім нагріванням опором широко використовують в різних галузях промисловості, зокрема для з'єднання деталей різноманітної товщини та конфігурації зі сталей різних класів [4–7]. При КСЗО залізничних рейок застосовують попереднє нагрівання імпульсами струму [4, 5] (рис. 1, а), щоб забезпечити відведення тепла від торців углиб заготовок. Для більш ефективного нагрівання опором заготовок з алю-

мінієвих сплавів, які мають високі значення електро- та теплопровідності, використовують безперервне пропускання струму [1–3] (рис. 1, б).

Такий процес нагрівання має низькі енергетичні показники, а його тривалість досягає 80 % загальної тривалості зварювання [1]. Крім того, для забезпечення формування бездефектних з'єднань зі збільшенням товщини зварюваних заготовок зростають необхідні температури попереднього нагрівання опором. Зокрема, в роботі [2] показано, що при КСЗО сплаву 2219 оптимальні умови деформації при осадці забезпечуються при нагріванні контактної зони на ділянці інтенсивної деформації до температури близько 400 °С. Необхідність підвищення температури попереднього нагрівання опором обумовлює додаткову витрату енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини, при цьому збільшується тривалість етапу нагрівання опором, що призводить до збільшення ширини ЗТВ зварних стиків і негативно впливає на механічні та експлуатаційні властивості зварних виробів з алюмінієвих сплавів.

Підвищення ефективності попереднього нагрівання опором, зменшення його тривалості та втрати енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини є актуальною проблемою, розв'язання якої забезпечить суттєву економію енергії та підвищення механічних властивостей зварних з'єднань виробів з високоміцних алюмінієвих сплавів.

Гушин К.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3298-4537>, Зяхор І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7780-0688>,
Самотрясов С.М. – <https://orcid.org/0000-0003-4891-9625>, Завертанний М.С. – <https://orcid.org/0000-0002-8415-8555>,
Левчук А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-0361-7394>

© К.В. Гушин, І.В. Зяхор, С.М. Самотрясов, М.С. Завертанний, А.М. Левчук, Wang Qichen, 2022

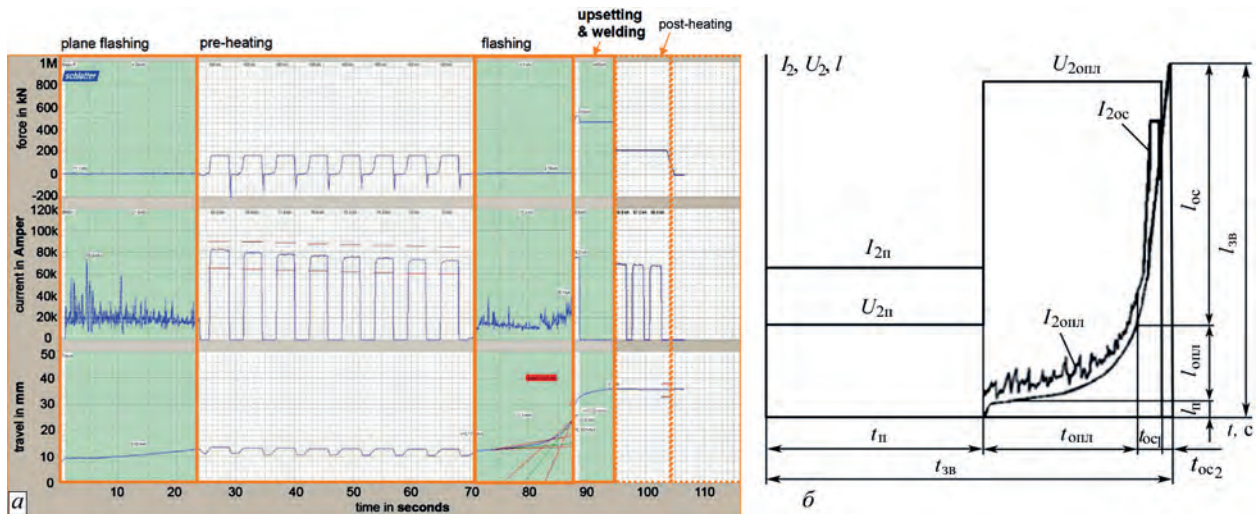


Рис. 1. Циклограми процесу КСЗО з попереднім нагріванням імпульсами (а) струму [5] і безперервним (б) пропусканням струму [2]

Відомі технічні рішення, в яких для підвищення ефективності нагрівання при КСЗ опором використовують проміжний прошарок у вигляді композитної вставки, зокрема при зварюванні сталевій арматури [8], а також у вигляді нанощаруватой фольги (НФ), зокрема при зварюванні алюмінідів титану в одно- [9] та різнорідному [10] з'єднаннях.

В роботі [8] при КСЗ опором сталевій арматури проміжним прошарком була офлюсована композитна вставка із профільованого листа з низьковуглецевої сталі, що дозволило локалізувати процес виділення тепла в зоні контакту. Показано, що при пропусканні струму через стик із вставкою, яка має більш високий питомий опір, відбувається її інтенсивне нагрівання та розплавлення. При цьому забезпечується локалізація тепловиділення порівняно з традиційним способом нагрівання опором, що сприяє формуванню якісних з'єднань при меншій ширині ЗТВ, ніж при зварюванні без використання проміжного прошарку.

Автори [9, 10] досліджували особливості формування одно- та різнорідних з'єднань сплаву Ti-46Al-2Cr-2Nb на основі алюмініду титану $\gamma\text{-TiAl}$ при КСЗ опором, зокрема, з використанням проміжних прошарків у вигляді НФ. В роботі зазначено, що наявність НФ у зоні контакту сприяє утворенню тонкого шару рідкої фази на початковій стадії процесу нагрівання, локалізації процесу тепловиділення, активації поверхонь обох сплавів при значно меншій тривалості стадії нагрівання порівняно із зварюванням без використання проміжного прошарку.

У роботах [8–10] проміжною вставкою були тонкі фольги, що розплавляються в процесі зварювання і переважно витісняються із зони контакту при осадці, але частково можуть залишатись у зварних з'єднаннях, суттєво впливаючи на їхні механічні властивості.

На відміну від розглянутих вище схем використання одноразової вставки, яка залишається в

стику, для попереднього нагрівання опором при КСЗО запропоновано застосувати багаторазову вставку з матеріалу з високими показниками температури плавлення та омичного опору. Запропоновано технологічну концепцію КСЗО з використанням багаторазової проміжної вставки, яка деякою мірою аналогічна процесу зварювання встик нагрітим інструментом полімерних матеріалів [11]. Однак вона суттєво відмінна, оскільки виділення тепла відбувається як у вставці, так і в зварюваних деталях, і процес формування температурного поля залежить від електричних, а також теплових процесів з урахуванням їхньої складної взаємодії.

Мета роботи – встановити можливість підвищення ефективності процесу попереднього нагрівання опором при КСЗО алюмінієвих сплавів шляхом інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту заготовок при використанні проміжної вставки з матеріалу з високим омичним опором.

Методи досліджень, методика, матеріали, устаткування. В роботі використовували розрахункові та експериментальні методи досліджень, зокрема проводили розрахунок термічних циклів і визначення температурних полів у зоні контакту заготовок за допомогою математичного моделювання процесу нагрівання та емпіричним методом при проведенні експериментів у лабораторних умовах.

Експерименти проводили на модернізованій машині для КСЗО K607 з переобладнаним зварювальним контуром, де джерелом живлення використано зварювальний трансформатор потужністю 75 кВ·А, розміщений безпосередньо під струмопідвідними затискачами машини.

Для проведення дослідних зварювань використовували зразки з алюмінієвого сплаву 2219 з поперечним перерізом 32×60 мм. Проміжною вставкою слугували пластини з аустенітної сталі 12X18H10T товщиною 7 мм. Експериментальні температурні поля досліджували за допомогою

комп'ютеризованої системи реєстрації температури на базі 8-канального USB-модуля для термопар Advantech USB-4718 з використанням термопар хромель-алюмель діаметром 0,5 мм.

На рис. 2 наведено програму зміни параметрів режиму КСЗО, яка передбачає послідовну зміну чотирьох основних етапів нагрівання перед формуванням зварного з'єднання при осадці. Між I і II етапами виконують розведення зварювальних деталей і затискання проміжної вставки між ними, а між II і III етапами – відповідно розведення деталей і виведення вставки із зазору між ними.

Схему розташування проміжної вставки між зварюваними деталями, яка пропонується в даній роботі, наведено на рис. 3. При такій схемі нагрівання кількість теплоти dQ , що виділяється у деталях при нагріванні опором за проміжок часу dt згідно з законом Джоуля–Ленца, можна представити як

$$dQ = I_{зв}^2 (R_{вст} + R_{дет} + 2R_k) dt, \quad (1)$$

де $I_{зв}$ – зварювальний струм; $R_{вст}$ – електричний опір вставки; $R_{дет}$ – електричний опір зварюваних деталей; R_k – перехідний опір контактів між деталями та вставкою.

Розрахункове дослідження процесу нагрівання опором. При КСЗО з попереднім нагріванням опором суттєвим є досягнення певного значення температури в зоні інтенсивної деформації.

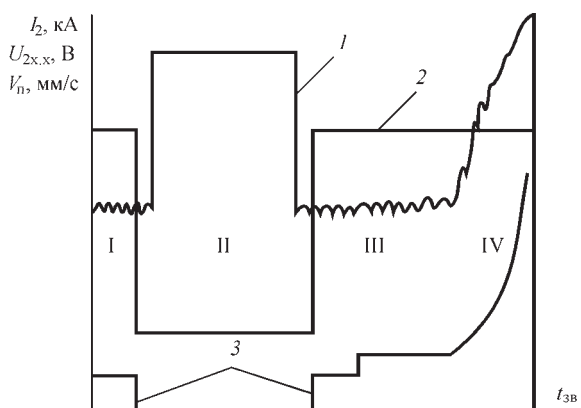


Рис. 2. Програма зміни параметрів процесу КСЗО з попереднім нагріванням опором з використанням проміжної вставки: I – попереднє опалення; II – нагрівання опором через проміжну вставку; III – опалення при постійній швидкості; IV – інтенсивне опалення (форсування) перед осадкою; 1 – зварювальний струм I_2 ; 2 – вторинна напруга холостого ходу зварювального трансформатора $U_{2x.x}$; 3 – переміщення рухомої колони зварювальної машини V_n

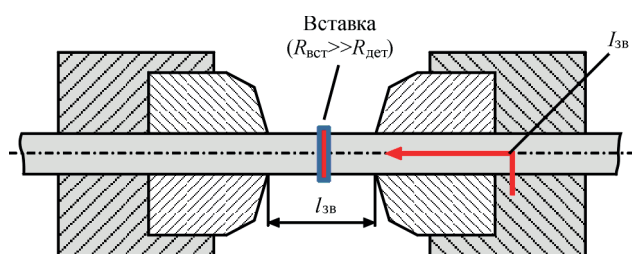


Рис. 3. Схема процесу нагрівання опором через проміжну вставку в струмопідвідних затискачах машини для КСЗО ($l_{зв}$ – припуск на зварювання)

Оптимальні умови формування зварного з'єднання при осадці створюються за умови рівності меж плинності та міцності матеріалу заготовок в зоні деформації [2]. У даному випадку забезпечується отримання зварних з'єднань з мінімальним рівнем внутрішніх напружень за відсутності мікротріщин та інших дефектів. При КСЗО з примусовим формуванням ширина зони інтенсивної деформації практично співпадає зі значенням припуску на осадку, тому оптимальні умови деформації заготовок із сплаву 2219 створюються при температурі близько 400 °C [2].

Для оптимізації температурного поля при попередньому нагріванні заготовок опором суттєвим є досягнення заданої температури в характерних точках, а саме: першій – на торцях заготовок (зона контакту) і другій – на відстані близько 30 мм від зони контакту. Це значення, яке визначали на основі попереднього практичного досвіду по КСЗО товстостінних деталей з алюмінієвих сплавів, відповідає половині встановленого значення загального припуску на зварювання $l_{зв} = 60$ мм ($l_{зв}/2 = 30$ мм), тобто друга характерна точка після виконання процесів опалення і осадки буде знаходитись у площині зварного з'єднання.

Критерієм ефективності нагрівання опором вважали досягнення заданої температури в характерних точках деталей за найменший час при заданому значенні щільності струму. З точки зору стабільності етапів опалення при постійній швидкості та інтенсивного опалення (див. рис. 2, III і IV етапи) бажаним результатом попереднього нагрівання опором є досягнення у першій із характерних точок (зоні контакту) найбільшого можливого значення температури, але не менше 150...200 °C [1, 12]. Критерієм достатнього нагрівання опором деталей вважали досягнення температури 150 °C у другій з характерних точок (на відстані 30 мм від зони контакту). У цьому випадку в процесі наступних етапів КСЗО досягається поступове нагрівання деталей до температури 400 °C у зоні деформації між формуючими пристроями зварювальної машини і забезпечуються необхідні умови для формування бездефектних зварних з'єднань при осадці.

Процес формування температурного поля при КСЗО обумовлений складним розподілом джоулевих джерел теплоти. Теплопередача, яка поряд з тепловідведенням формує поле температур у металі, здійснюється кондуктивним шляхом. Теплопровідність металу, його питомий електричний опір та інші фізичні властивості суттєво залежать від температури. Сила зварювального струму, що визначає інтенсивність теплового впливу на метал, залежить від напруги холостого ходу, опору зварюваних деталей і внутрішнього опору машини для контактного зварювання. Тому

адекватна математична модель процесу формування температурного поля при контактному нагріванні повинна включати опис електричних і теплових процесів у зварюваному металі з урахуванням їхньої складної взаємодії. Сила зварювального струму (щільність струму) повинна задаватися на основі експериментальних даних. Виділення тепла визначається розрахунковим шляхом з урахуванням електричного опору зони зварювання, а властивості металу в кожній точці розрахункової області необхідно задавати відповідно до поточного розподілу температурного поля деталі.

На відміну від переважно об'ємного тепловиділення у заготовках між струмопідвідними застискачами зварювальної машини при нагріванні опором без вставки (перехідний опір контакту між деталями з алюмінієвих сплавів незначний), при нагріванні опором через вставку з'являється додаткове джерело тепловиділення, яке може бути лінійним (при незначній товщині вставки, зокрема при використанні тонкої фольги) або об'ємним (при використанні пластини товщиною кілька міліметрів). В останньому випадку температурне поле у нагрітих деталях буде формуватись за законом, близьким до експоненти.

Розрахункову схему для випадку одномірної задачі наведено на рис 4.

Розподілом температури в поперечному перерізі зварюваних заготовок для спрощення розрахунку можна знехтувати. Виходячи з цього завдання вирішується в одновимірній постановці. Одновимірне нестационарне рівняння теплопровідності для випадку одновимірного завдання в декартових координатах має вигляд [13]

$$c(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + q_v, \quad (2)$$

де T – температура, К; t – час, с; q_v – об'ємна щільність внутрішніх джерел тепла, Вт/м³.

Проведено дискретизацію розрахункової області, яка полягає в заміні безперервної області визначення та безперервної області значення функції на відповідні дискретні області. У нашому нестационарному завданні необхідно провести дискретизацію як просторової розрахункової області, так і часової. За початок відліку оберемо один з торців деталей, що нагрівається.

Виділимо на відрізку осі x точку x_i , $i = 0 \dots 1, \dots, n-1, n$. Прийmemo, що відстань між двома су-

сідніми точками дискретизації x_i та x_{i+1} , рівна кроку дискретизації h , буде однаковою, тобто дискретизація розрахункової області рівномірна. При цьому кожній точці дискретизації x_i відповідає значення температури t_i .

Зварний зразок має поперечний переріз з розмірами $a \times b$, тому об'єм одного елемента визначається за формулою $a \times b \times h$. Якщо попередньо не враховувати нелінійність теплофізичних властивостей деталей, що нагріваються (залежності $\lambda(T)$, $c(T)$ і $\gamma(T)$), тоді нелінійність завдання полягатиме лише в урахуванні залежності щільності потужності джерела Джоулева тепла $q_{дж}$:

$$q_{дж}(T) = \frac{I^2 \rho(T) h}{ab h(ab)} = \frac{I^2 \rho(T)}{a^2 b^2}, \quad (3)$$

де $\rho(T)$ – температурна залежність питомого електричного опору деталей.

З урахуванням виразу (2) запишемо апроксимацію вихідного диференціального рівняння теплопровідності (1) для i -ї просторової точки та j -го моменту часу

$$c_i(T_i^*)\gamma_i(T_i^*)\frac{T_i - T_i^*}{t - t^*} = \frac{2}{(x_{i+1} - x_{i-1})} \times \left[\lambda_{i+1}(T_{i+1}^*)\frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i} - \lambda_i(T_i^*)\frac{T_i - T_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right] + \frac{I^2 \rho_i(T_i^*)}{a^2 b^2}, \quad (4)$$

де T_i^* – температура в розрахунковому вузлі на попередньому часовому кроці (величина кроку – Δt); $c_i(T_i^*)$, $\gamma_i(T_i^*)$, $\lambda_i(T_i^*)$ – температурна залежність відповідно теплоємності, щільності та теплопровідності деталей, що нагріваються.

Для розрахунку температурного поля в математичну модель вводять такі вхідні дані: геометричні розміри зварюваних деталей та товщину проміжної вставки; теплофізичні характеристики алюмінієвого сплаву та матеріалу проміжної вставки (таблиця). Основними вхідними параметрами режиму нагрівання є щільність струму та час нагрівання.

З використанням розробленої математичної моделі проведено розрахунок температурних полів при нагріванні опором заготовок алюмінієвого сплаву 2219 перерізом 32×60 мм залежно від товщини проміжної вставки $h_{вст}$ зі сталі 12Х18Н10Т при часі нагрівання $t_h = 60$ с (рис. 5) та різній щільності струму J при $t_h = 40$ с (рис. 6).

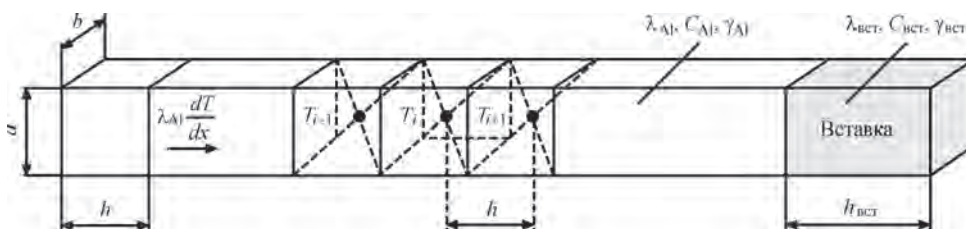


Рис. 4. Схема сітки розрахункової моделі

Теплофізичні характеристики сталі 12X18H10T та сплаву 2219

$T, ^\circ\text{C}$	12X18H10T			Сплав 2219		
	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	$c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\rho\cdot 10^{-9}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	$c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\rho\cdot 10^{-9}, \text{Ом}\cdot\text{м}$
20	15	450	725	130	0,8	55,3
100	16	462	792	142	0,86	62,4
200	18	496	861	155	0,92	72,2
300	19	517	920	163	1,05	77,2
400	21	538	976	167	1,05	85,6
500	23	550	1028	-	-	-
600	25	563	1075	-	-	-
700	27	575	1115	-	-	-

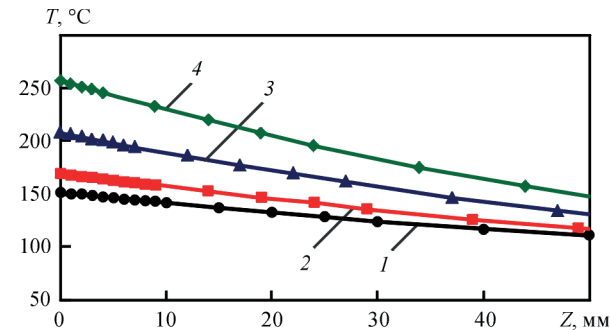


Рис. 5. Розрахункові температурні поля при нагріванні опором через проміжну вставку із сталі 12X18H10T товщиною $h_{\text{вст}} = 2$ (2), 6 (3), 12 (4) мм та без вставки (1) ($h_{\text{вст}} = 0$ мм) для щільності струму $J = 10 \text{ А}/\text{мм}^2$ і $t_{\text{н}} = 60 \text{ с}$ (Z – відстань від торців деталей)

За одержаними даними побудовано залежність температури характерних точок зварного з'єднання від щільності струму при нагріванні опором без вставки та з використанням проміжної вставки із сталі 12X18H10T (рис. 7).

Аналіз отриманих розрахункових температурних полів (рис. 5) показує, що при нагріванні опором без вставки деталей сплаву 2219 перерізом $32\times 60 \text{ мм}$ за час до $t_{\text{н}} = 60 \text{ с}$ при щільності струму $J = 7,5$ і $10 \text{ А}/\text{мм}^2$ не забезпечується досягнення заданої температури в характерних точках деталей – у зоні контакту і на відстані 30 мм від торців. Необхідний для формування якісних з'єднань розподіл температур при нагріванні опором без вставки досягається при щільності струму $J \geq 12,5 \text{ А}/\text{мм}^2$ (рис. 6, а), що на практиці обумовлює значні втра-

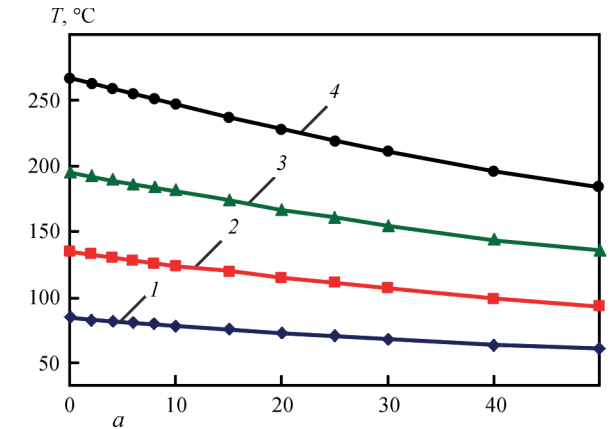
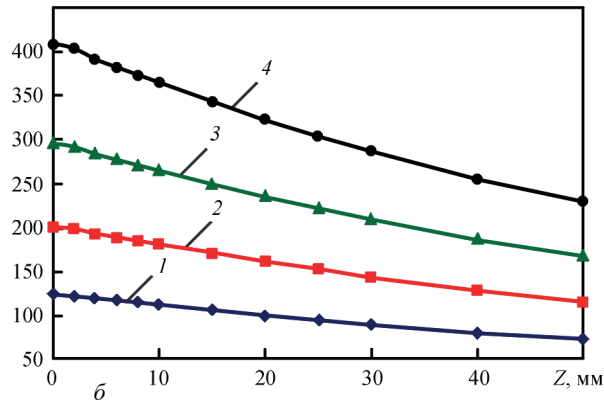


Рис. 6. Розрахункові температурні поля при нагріванні опором без вставки (а) та через проміжну вставку із сталі 12X18H10T товщиною $h_{\text{вст}} = 7 \text{ мм}$ (б) при $t_{\text{н}} = 40 \text{ с}$ і щільності струму $J = 7,5$ (1), 10 (2), 12,5 (3), 15 (4) $\text{А}/\text{мм}^2$

ти енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини і необхідність використання джерела живлення високої потужності.

Результати розрахунків, наведені на рис. 5 і 6, свідчать про значний ефект використання проміжної вставки при нагріванні опором – суттєво підвищується температура в обох характерних точках при всіх досліджуваних значеннях щільності струму, товщини вставки і часу нагрівання. Встановлено, що ефективність процесу нагрівання опором через проміжну вставку залежить від її товщини: заданий розподіл температур в деталях із сплаву 2219 при щільності струму $J = 10 \text{ А}/\text{мм}^2$ і часі нагрівання $t_{\text{н}} = 60 \text{ с}$ досягається при $h_{\text{вст}} \geq 6 \text{ мм}$.

Для заданої товщини вставки ефективність процесу нагрівання збільшується зі зростанням щільності струму J (рис. 6, б), зокрема заданий розподіл температури в деталях при $h_{\text{вст}} = 7 \text{ мм}$ і часі нагрівання $t_{\text{н}} = 40 \text{ с}$ досягається для всіх досліджуваних значень щільності струму J , за винятком $J = 7,5 \text{ А}/\text{мм}^2$. Слід зазначити значне зростання температури в зоні контакту для всіх значень досліджуваних параметрів при нагріванні через вставку, зокрема при $J = 12,5\ldots 15 \text{ А}/\text{мм}^2$ до $T = 300\ldots 420 ^\circ\text{C}$ порівняно з $T = 180\ldots 270 ^\circ\text{C}$ при нагріванні без вставки. Останній факт особливо важливий з точки зору стабільності етапів оплавлення при постійній швидкості (див. рис. 2, II етап) та інтенсивного оплавлення перед осадкою (IV етап), і з практичної точки зору дає можли-



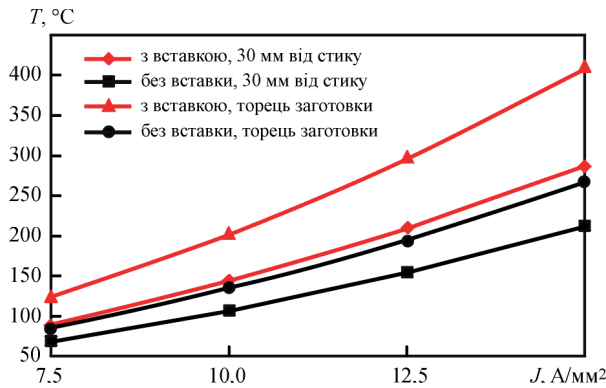


Рис. 7. Розрахункова залежність температури характерних точок зварного з'єднання від щільності струму J при нагріванні опором з використанням проміжної вставки із сталі 12X18H10T та без неї

вість гарантувати відсутність дефектів зварювання (непроварів, оксидних плівок, матових плям) при суттєво меншій потужності джерела живлення зварювальної машини.

Отримані результати підтверджують припущення, що при нагріванні опором через вставку з'являється додаткове об'ємне джерело тепловиділення, яке забезпечує більш швидке нагрівання металу в обох характерних точках – в зоні інтенсивної деформації при осадці та зоні контакту деталей, і обумовлює зменшення втрати енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини.

Експериментальне дослідження процесу нагрівання опором. Експерименти з дослідження термічних циклів нагрівання опором деталей перерізом 32×60 мм з алюмінієвого сплаву 2219 проводили при вторинній напрузі трансформатора $U_{2xx} = 3$ В. Термопари хромель-алюмель діаметром 0,5 мм встановлювали в деталі на відстані 5, 10, 20 та 30 мм від торців з внутрішньої сторони вторинного контуру зварювальної машини. Виконували безпосереднє нагрівання деталей (без вставки) і через проміжну вставку із сталі 12X18H10T при щільності струму близько 10 А/мм^2 і часі нагрівання $t_n = 40$ і 85 с. Виходячи з результатів розрахунків, що свідчать про доцільність використання вставки при її товщині $h_{вст} \geq 6$ мм, експериментальне дослідження температурних полів проводили при $h_{вст} = 7$ мм.

Результати експериментів показують, що без застосування проміжної вставки при заданих енергетичних параметрах режиму попереднього нагрівання не вдалось досягнути необхідного розподілу температурного поля за час $t_n = 40$ і 85 с (рис. 8, криві 2, 3). При $t_n = 85$ с процес нагрівання практично перейшов у квазістаціонарний стан. Температура в зоні контакту при $t_n = 85$ с становила близько 170°C , а на відстані 30 мм – 140°C . При нагріванні деталей через вставку із сталі 12X18H10T суттєво підвищується температура в обох характерних точках і розподіл температур, не-

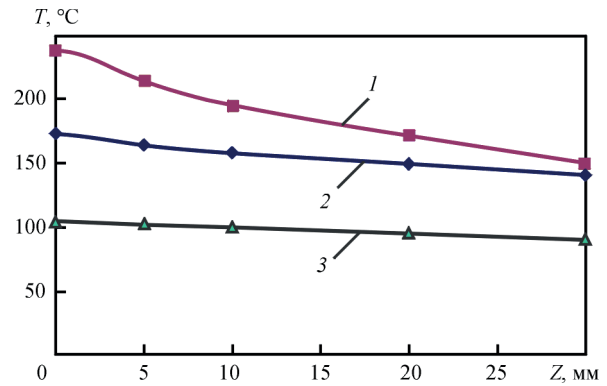


Рис. 8. Температурні поля при попередньому нагріванні опором з використанням проміжної вставки із сталі 12X18H10T товщиною $h_{вст} = 7$ мм (1) та без вставки (2, 3) при часі нагрівання $t_n = 40$ (1, 3) і 85 с (2)

обхідний для проведення наступних етапів опалвлення, досягається за час $t_n = 40$ с (рис. 8, крива 1).

Варто відзначити значне зростання температури в зоні контакту при нагріванні через вставку при $t_n = 40$ с, і значно вищий градієнт температурного поля порівняно з нагріванням без вставки при $t_n = 85$ с. Експериментально встановлене зростання температури в зоні контакту особливо важливе з точки зору стабільності етапів опалвлення і запобігання утворенню дефектів у зварних з'єднаннях. При КЗСО термічнозмцнених сплавів зменшення тривалості етапу нагрівання опором сприяє мінімізації негативних структурних і фазових перетворень у зоні термічного впливу і обумовлює збереження на більш високому рівні показників міцності, корозійної стійкості та інших експлуатаційних властивостей зварних виробів [12].

Експериментальне дослідження температурних полів у деталях із сплаву 2219 при їхньому нагріванні опором з використанням проміжної вставки із сталі 12X18H10T при $t_n = 40 \dots 85$ с свідчить про інтенсифікацію та локалізацію процесу тепловиділення в зоні контакту порівняно з процесом нагрівання без вставки і підтверджують дані розрахунків відповідно до запропонованих узагальнень.

Отже, результати розрахунків та експериментального дослідження температурних полів свідчать про підвищення ефективності процесу попереднього нагрівання опором при КЗСО алюмінієвих сплавів при використанні проміжної вставки з матеріалу з високим електричним опором. Зазначений ефект досягається за допомогою інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту деталей і відповідного зменшення «нераціональної» втрати енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини.

Висновки

1. Запропоновано технологічну концепцію контактного стикового зварювання опалвленням (КЗСО) товстостінних деталей з алюмінієвих спла-

вів з попереднім нагрівання опором з використанням багаторазової проміжної вставки. Розрахунковим шляхом досліджували ефективність процесу попереднього нагрівання опором при КСЗО алюмінієвого сплаву 2219 при використанні проміжної вставки із сталі 12X18H10T. Критерієм ефективності нагрівання опором вважали досягнення заданої температури в характерних точках деталей – у зоні контакту і на відстані 30 мм від торців деталей за найменший час при заданому значенні щільності струму.

2. Встановлено, що порівняно з безпосереднім нагріванням деталей опором при використанні проміжної вставки із сталі 12X18H10T суттєво підвищується температура в обох характерних точках при всіх досліджуваних значеннях щільності струму, товщини вставки і часу нагрівання.

3. Для заданої товщини вставки $h_{\text{вст}}$ в досліджуваному діапазоні $h_{\text{вст}} = 2 \dots 12$ мм ефективність процесу нагрівання збільшується зі зростанням щільності струму J , а при заданому значенні J в діапазоні $J = 7,5 \dots 15$ А/мм² – при збільшенні товщини вставки.

4. Встановлено суттєве зростання градієнта температурного поля в деталях при нагріванні через вставку: температура в зоні контакту при $J = 12,5 \dots 15$ А/мм² становила $T = 300 \dots 420$ °С порівняно з $T = 180 \dots 270$ °С при нагріванні без вставки. Зазначений результат важливий з точки зору стабільності наступних етапів оплавлення при КСЗО і з практичної точки зору дає можливість гарантувати відсутність дефектів зварювання при суттєво меншій потужності джерела живлення зварювальної машини.

5. Експериментальне дослідження температурних полів у деталях із сплаву 2219 при їхньому нагріванні опором з використанням проміжної вставки із сталі 12X18H10T підтверджують розрахункові дані і свідчать про інтенсифікацію та локалізацію процесу тепловиділення в зоні контакту порівняно з процесом нагрівання без вставки.

Список літератури/References

1. Кучук-Яценко С.И. (1992) *Контактная стыковая сварка оплавлением*. Киев, Наукова думка.
2. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1992) *Flash butt welding*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
3. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Chvertko, P.N., Semyonov, L.A. et al. (2010) Peculiarities of flash butt welding of high-strength aluminium alloy 2219. *The Paton Welding J.*, **3**, 7–9.
4. Кучук-Яценко С.И., Гушин К.В. (2018) *Контактная стыковая сварка оплавлением высокопрочных сплавов на основе алюминия. Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. Київ, Академперіодика.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Gushchin, K.V. (2018) *Flash butt welding of high-strength aluminium-based alloys*. In: *Science of Materials: Achievements and Prospects*. Kyiv, Akademperiodyka [in Russian].
6. Weingrill, L., Krutzler, J., Enzinger, N. (2017) Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*, 879, 2088–2093. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088.
7. <https://www.schlattergroup.com/en/welding-machines/flash-butt-welding-machines-for-rails/> [дата звернення 28.06.2022].
8. Патент CN103894717A (2014) *Preheating burnoff flash butt welding method for welding large-section steel vehicle wheels*. Patent CN103894717A (2014) *Preheating burnoff flash butt welding method for welding large-section steel vehicle wheels*.
9. Shi, S.-C., Wang, W.-C., Ko, D.-K. (2022) Influence of inclusions on mechanical properties in flash butt welding joint of high-strength low-alloy steel. *Metals*, **12**, 242, 1–13. DOI: 10.3390/met12020242.
10. Kuchuk-Yatsenko, V.S., Nakonechny, A.A., Sakhatsky, A.G. (2010) Resistance welding of steel reinforcement using composite insert. *The Paton Welding J.*, **4**, 34–36.
11. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Zyakhor, I.V., Chernobaj, S.V. et al. (2015) Structure of γ -TiAl joints in resistance butt welding with application of interlayers. *Ibid*, **9**, 5–12. DOI: 10.15407/tpwj2015.09.01.
12. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Zyakhor, I.V., Nakonechny, A.A. et al. (2018) Resistance butt welding of titanium aluminide γ -TiAl with VT5 alloy. *Ibid*, **9**, 2–6. DOI: 10.15407/tpwj2018.09.01.
13. Юрченко М.В. (2019) Новітній технологічний підхід зварювання «в замкнутому об'ємі» нагрітим інструментом встик полімерних багатошарових композитних труб. *Вісник ХНТУ. Інженерні науки*, **1**, 68, 65–72.
14. Iurzhenko, M.V. (2019) Novel technological approach to butt welding «in closed volume» with heated tool of polymer multilayer composite pipes. *Visnyk KhNTU. Inzhenerni Nauky*, **1** (68), 65–72 [in Russian].
15. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Hushchyn, K.V., Zyakhor, I.V. et al. (2021) Structure and mechanical properties of 2219-T87 aluminium alloy joints produced by flash butt welding. *The Paton Welding J.*, **8**, 27–32.
16. Ткаченко В.Н. (2008) *Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов*. Киев, Наукова думка.
17. Tkachenko, V.N. (2008) *Mathematical modeling, identification and control of technological processes of heat treatment of materials*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

FEATURES OF RESISTANCE PREHEATING AT FLASH-BUTT WELDING OF THICK-WALLED PARTS FROM ALUMINIUM ALLOYS

K.V. Hushchyn¹, I.V. Zyakhor¹, S.M. Samotryasov¹, M.S. Zavertannyi¹, A.M. Levchuk¹, Wang Qichen²

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²CIMC Offshore Engineering Institute Company Limited, Yantai, Shandong, P.R. China

The technological concept of flash-butt welding with resistance preheating using a reusable intermediate insert of a material with a high electrical resistance is proposed and substantiated by calculation. Calculation and experimental results indicate a significant effect of using intermediate insert during resistance heating: the temperature at both characteristic spots grows significantly at all investigated values of current density, insert thickness and heating time. The specified effect is achieved by intensifying and localizing the process of heat generation in the contact area of parts and correspondingly reducing the energy loss for heating the secondary circuit of the welding machine. 13 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Key words: flash-butt welding, resistance heating, aluminum alloy, mathematical modeling, temperature field

Надійшла до редакції 22.08.2022

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ
З’ЄДНАННЯ ЛАТУНЬ–СТАЛЬ, ОТРИМАНОГО
ПЛАКУВАННЯМ В АВТОВАКУУМІ

І.П. Серебряник, М.А. Полещук, Т.О. Зубер, А.І. Бородін, А.Ю. Тунік, О.А. Лось

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

Розглянуто технологічні особливості отримання з’єднання латунь–сталь методом нагрівання в автовакуумі. Товщина латунного шару після механічної обробки становила 10 мм. Дослідженнями структур та хімічного складу різних зон з’єднання підтверджено розчинно-дифузійний характер взаємодії рідкої латуні зі сталлю. Виміри мікротвердості показали відсутність твердих і крихких структур. Високу якість з’єднання підтверджено механічними випробуваннями двохшарового з’єднання на статичний вигин, відрив та зріз. Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: латунь, сталь, двохшарове з’єднання, нагрівання в автовакуумі

Вступ. З’єднання латуні з вуглецевими сталями використовують при виготовленні різних виробів. Це двохшарові втулки, опорні вузли [1], листовий прокат з плакуючим шаром зі сплавів міді [2], з’єднання сталевих та чавунних деталей, у яких латунь використовують як припой [3]. Здебільшого такі з’єднання формуються за умов атмосферного тиску. Паяні з’єднання отримують також у вакуумі або контрольованій атмосфері.

Нормативна документація на виготовлення трубних ґрат для сучасних трубчастих теплообмінників передбачає високу якість з’єднання латунь–сталь при площі з’єднання понад $1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^2$ і товщині плакуючого шару 10 мм [4].

Мета роботи – розробка економічної технології виготовлення якісного з’єднання латунь–сталь великої площі з товщиною латуні до 10 мм. При цьому повинно використовуватись існуюче обладнання промислових підприємств.

Дослідна частина цієї роботи є продовженням виконаних досліджень взаємодії рідкої міді зі сталлю [5] і підтвердила їхні основні висновки.

Матеріали та методики досліджень. Сталеву основу з’єднання виготовляли зі сталі Ст14Г2 [6], латунний шар – з латуні Л59 [7]. Зібраний пакет для плакування герметизували зварюванням вакуумно-щільними швами. Вакуумним насосом 2НВР-5ДМ з пакета відкачували повітря до $2 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$.

Нагрівання зразків проводили в термічній печі СНОЛ-04534.

Методом металографічного аналізу досліджували макро- і мікроструктуру поздовжнього та поперечного перерізів отриманих з’єднань. Дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопа «Neophot-32», оснащеного приставкою для цифрової зйомки. Систему реєстрації зображень здійснювали за допомогою комп’ютерної програми QuickPhoto.

Зразки для металографічних досліджень готували за стандартними методиками. Виміри мікротвердості проводили на твердомірі М-400 фірми «LECO» при навантаженні 0249 і 0496 Н. Реактиви для виявлення мікроструктури зразків (табл. 1) підібрано згідно з нашими розробками та рекомендаціями роботи [8].

Дослідження зразків методами растрової електронної мікроскопії (РЕМ), рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) проводили на приладі «Jamp-9500F» фірми «Jeol» (Японія) з встановленим на ньому рентгенівським енергодисперсійним спектрометром INCA Penta FETx3 (OXFORD INSTRUMENTS). Енергія первинного електронного пучка становила 10 кеВ при струмі 0,5 мА для методів РЕМ і РСМА та струмі 10 мА для методу Оже-електронної спектроскопії. Спектри Оже реєстрували з енергетичним

Таблиця 1. Реактиви для металографічного травлення зразків

Мета травлення	Склад реактиву	Спосіб застосування	Примітка
Виявлення мікроструктури	HNO_3 – 50 мл H_2O – 50 мл	Хімічне травлення при інтенсивному перемішуванні реактиву $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 5 \dots 30 \text{ с}$	Видалення оксидної плівки: HCl – 20 мл H_2O – 80 мл $\tau = 1 \dots 3 \text{ с}$, $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Виявлення макроструктури	HNO_3 – 50 мл H_3PO_4 – 25 мл (CH_3COOH) – 25 мл	Хімічне травлення при інтенсивному перемішуванні та підігріві реактиву до $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau = 3 \dots 7 \text{ с}$	

Серебряник І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8654-1331>, Полещук М.А. – <https://orcid.org/0000-0020-5992-4641>, Зубер Т.О. – 0000-0003-0789-1128, Тунік А.Ю. – 0000-0001-6801-6461.

© І.П. Серебряник, М.А. Полещук, Т.О. Зубер, А.І. Бородін, А.Ю. Тунік, О.А. Лось, 2022

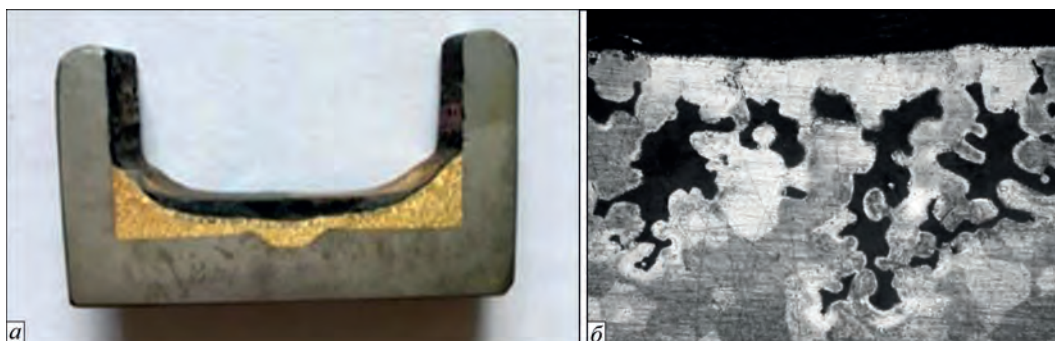


Рис. 1. З'єднання латунь–сталь, отримане відкритим нагріванням: а – макрошліф з'єднання; $\times 1,5$; б – несучільність у поверхневому шарі латуні, $\times 100$

дозволом $\Delta E/E = 0,6\%$. Перед дослідженнями поверхню зразків піддавали очищенню безпосередньо в камері аналізу приладу шляхом травлення іонами аргону Ar^+ з енергією 1 кеВ протягом 10 хв. Швидкість травлення SiO_2 становила 4 нм/хв. Вакуум у камері аналізу був у межах $5 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ Па.

Результати досліджень. Отримання якісного з'єднання латунь–сталь заливкою при використанні відкритого нагрівання в термічній печі є неможливим через утворення пор та несучільностей в латуні, спровокованих випаровуванням цинку [9]. При цьому поверхня латунного шару має дефекти на глибину до 500 мкм. Це призводить до високих трудовитрат на механічну обробку латунної поверхні та додаткових витрат латуні на технологічний припуск. На рис. 1 зображено з'єднання латунь–сталь, отримане відкритим нагріванням, та мікроструктура поверхневого шару латуні.

При пошуках заміни відкритого нагрівання розглянуто відомі способи отримання двошарових заготовок латунь–сталь: вибухове зварювання [10], дугове наплавлення під флюсом [11], лазерне зварювання [12], плазмове наплавлення [13] тощо. Однак використання цих технологій потребує проектування та виготовлення спеціального обладнання.

Чинний досвід використання паяння в автовакуумі для отримання з'єднань латунь–сталь [14] показав, що ця технологія забезпечує високу якість з'єднання при товщині шару латуні 0,5...3,0 мм. Використання автовакууму передбачає використання існуючого промислового обладнання з незначним доповненням. Перш за все потрібно було забезпечити отримання плакуючого шару рівномірної товщини при мінімальному припуску на механічну обробку, для чого застосовано схему плакування з примусовим підживленням (рис. 2).

На зібраному пакеті зварили всі шви і перевірили їх на герметичність. За допомогою вакуумного насоса з внутрішньої порожнини відкачали повітря до $2 \cdot 10^{-2}$ Па. Вузол нагрівали в звичайній термічній печі при $T = 1000^\circ\text{C}$ і витримці 15 хв.

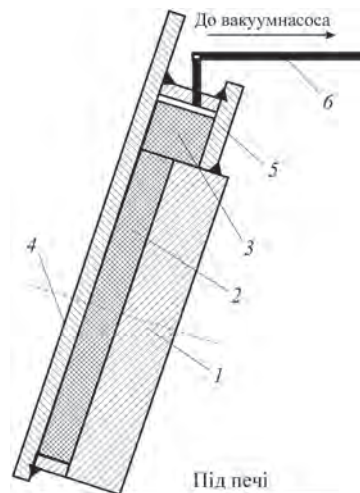


Рис. 2. Схема плакування заготовки затіканням з примусовим підживленням: 1 – основа з вуглецевої сталі; 2 – латунний лист; 3 – латунь для підживлення; 4 – кришка; 5 – накопичувач; 6 – патрубок до вакуумного насоса

Охолодження виконували з піччю до 400°C , далі – при відкритій засувці в атмосферних умовах.

Особливістю нагрівання вузла, який знаходиться в контейнері з вакуумованою порожниною, є те, що через відсутність в порожнині газу теплопередача здійснюється тільки випромінюванням. Час, потрібний для нагрівання вузла, для конкретних розмірів зазору між стінками контейнера та поверхнею вузла, становить 13 хв. Тому при проектуванні режиму нагрівання необхідно збільшити час витримки вузла при температурі паяння на 13(15) хв.

При огляді латунного шару (після зняття кришки механічною обробкою) встановлено, що латунь повністю розплавилася як в основній порожнині, так і в порожнині для підживлення, і має місце задовільне змочування сталевих деталей. У перерізі латунні пори і несучільності не спостерігаються (рис. 3).

Міцність і надійність з'єднання латунь–сталь безпосередньо пов'язана зі структурою та складом металів у зоні контакту. Металографічними дослідженнями встановлено, що сталь Ст14Г2 після нагрівання зберігає феритно-перлітну структуру. Структура латуні Л59 є двофазною ($\alpha + \beta$),

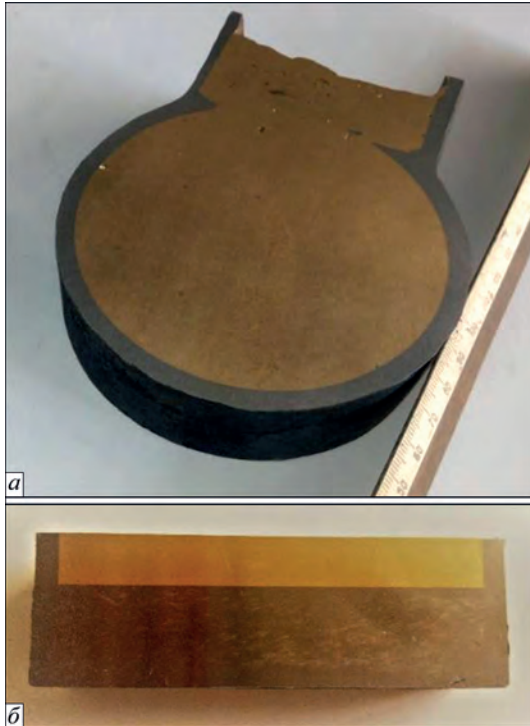


Рис. 3. Загальний вигляд (а) та діаметральний перетин (б) з'єднання латунь–сталь, отриманого в автовакуумі, $\times 0,5$

складається зі світлої α -матриці та дрібних ділянок β -фази, що травиться темніше (рис.4). Після проведення аналізу встановлено, що хімічний склад латуні після нагрівання змінився, зменшився вміст цинку з 40 до 37 мас. %.



Рис. 4. Мікроструктура з'єднання латунь–сталь після травлення, $\times 100$

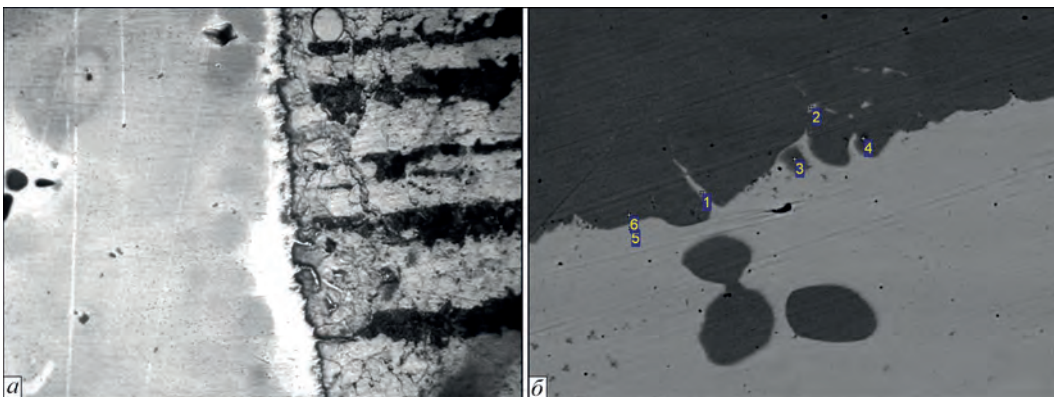


Рис.5. Зона контакту латуні зі сталлю: а – оптичне, $\times 500$; б – електронно-мікроскопічне $\times 1500$ зображення (травлено)

Принциповим при прогнозуванні надійності з'єднання є питання взаємодії рідкої латуні з твердою сталлю. Ці процеси неодноразово вивчалися різними авторами. Деякі з них стверджують, що на поверхні сталі при контакті з рідкою міддю та її сплавами в процесі наплавлення утворюються тріщини, які заповнюються рідиною [15]. У цьому разі склад металу, який заповнює «тріщину», повинен бути близьким до початкового, а вершина «тріщини» не може бути заповнена повністю відповідно до закону капілярності [5].

Інший погляд на взаємодію розплаву міді та її сплавів зі сталлю докладно наведено в [5]. Згідно з ним взаємодія розплаву латуні з твердою сталлю відбувається завдяки розчиненню та дифузії елементів, що знаходяться по границях зерен сталі, та подальшому відриву і переміщенню цих зерен в розплав. При цьому в ділянках проникнення латуні, крім вихідних елементів, мають реєструватися залізо та інші складові сталі.

При значному збільшенні зафіксовано проникнення латуні в сталь на оптичному (рис. 5, а) і електронному (рис. 5, б) мікроскопах на глибину 1,5...10 мкм. Хімічний склад металу досліджених ділянок наведено в табл. 2.

При проникненні латуні в сталь на глибину до 10 мкм в ній фіксується значна кількість заліза – 18,39...42,72 мас. % (ділянки 1,2). У зернах сталі, що відриваються і переходять в латунь (ділянки 3,4), реєструється міді – 5,68...10,85, цинку – 3,17...6,95 мас. %. В ділянках 5 і 6, де взаємопроникнення металів не спостерігається, дифузійні процеси менш значні. В латуні зафіксовано заліза 4,34, а в сталі–міді 3,49 і цинку 3,09 мас. %.

Таблиця 2. Хімічний склад металу досліджених ділянок з'єднання, мас. %

Номер ділянки	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
1	0,10	0,12	18,39	49,66	28,97
2	0,04	0,16	42,72	33,84	20,30
3	0,36	0,16	79,14	10,85	6,95
4	0,22	0,08	76,80	5,68	3,17
5	0,03	0,08	4,34	59,26	33,48
6	0,25	0,00	90,84	3,49	3,09

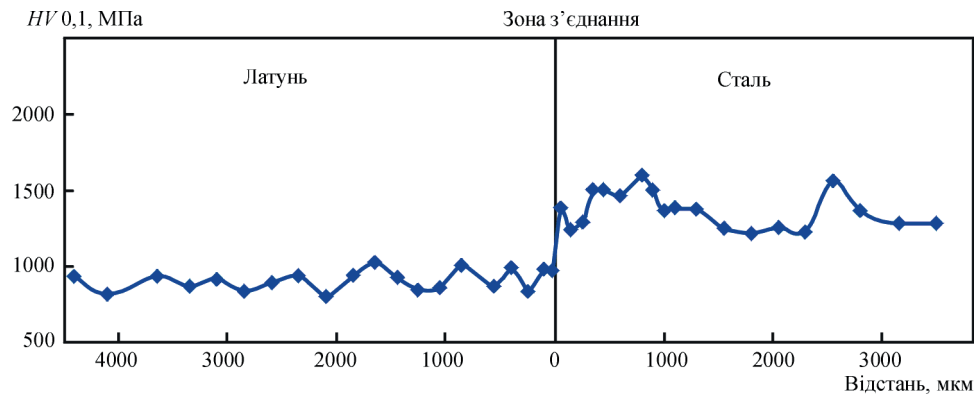


Рис. 6. Мікротвердість металу в з'єднанні латунь–сталь

При аналізі мікротвердості в ділянках латуні та сталі, що знаходяться біля зони контакту, не виявлено утворення твердих і крихких структур (рис. 6). У той же час необхідно звернути увагу на структуру сталі в зоні контакту з латунню (рис. 7).

Ланцюжок зерен темного кольору з боку сталі – це зерна перліту. Як відомо, вуглець сталі з міддю не взаємодіє. Концентрація його в зоні контакту зростає, що може призвести при тривалій витримці (більше 30 хв) до утворення з боку сталі ланцюжка крихких зерен перліту вздовж границі контакту. В зв'язку з цим тривалість витримки в печі обмежено 15 хв. У результаті накопичення перліту були незначні, про що свідчать дослі-

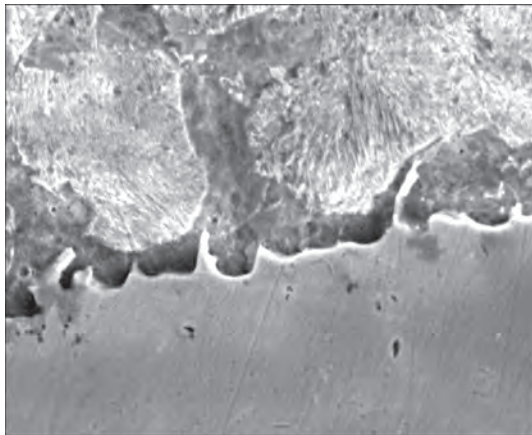


Рис. 7. Мікроструктура сталі в зоні контакту латунь–сталь, $\times 1600$

дження мікротвердості. Той же ефект мав місце при вивченні взаємодії рідкої міді зі сталлю [5].

З метою визначення механічних характеристик з'єднання латунь–сталь проведено випробування: на зріз плакуючого шару, на відрив плакуючого шару і статичний вигин. Випробування на зріз плакуючого шару виконували на зразках (рис. 8, а), які використовують для двошарових сталей, одержаних прокаткою [2]. Товщину плакуючого шару зразка доведено механічною обробкою до 5 мм. У результаті випробування встановлено, що межа міцності на зріз з'єднання латунь–сталь, отриманого нагріванням в автовакуумі, становить 194,2 МПа.

Випробування на статичний відрив плакуючого шару проводили на зразках, представлених на рис. 8, в. При цьому пуансон був такої форми, що забезпечував деформацію відриву в зоні з'єднання металів. Межа міцності на відрив плакуючого шару становила 266,7 МПа.

Випробування на статичний вигин плакуючим шаром всередину проводили на зразках (рис. 8, б) розміром $120 \times 20 \times 8$ мм, діаметр пуансона – 16 мм [17]. При куті вигину тріщин 180° , видимих неозброєним оком, на поверхнях зразка не знайдено.

Обговорення результатів досліджень. Аналіз витрат на виготовлення умовної одиниці продукції дуговим наплавленням, вибуховим зварюванням та розробленою технологією нагрівання в автовакуумі показав значні економічні переваги останньої. Обрана схема розташування пакета під кутом



Рис. 8. Зразки для механічних випробувань з'єднань латунь–сталь: а – випробування на зріз плакуючого шару; б – двошарове з'єднання після випробувань на статичний вигин плакуючим шаром всередину; в – до і після випробувань на відрив плакуючого шару

до вертикалі з підживленням плакуючого шару додатковою кількістю рідкої латуні забезпечила як отримання з'єднання без ливарних дефектів і пор, так і високу якість поверхні латунного шару безпосередньо після плакування. При цьому припуск на механічну обробку був мінімальний, витрати металу та трудомісткість на механічну обробку були також значно нижче, ніж в інших варіантах.

Металографічні дослідження показали, що у зоні з'єднання крихкі структури не утворюються. Взаємодія рідкої латуні зі сталлю відбувається без утворення тріщин у сталевому шарі. Не виявлено незаповнених вершин, проникнень латуні в сталь, склад металу, близький до вихідного складу латуні з доповненням деякими елементами, що входять до сталі. Ці результати добре корелюються з результатами раніше виконаних досліджень взаємодії рідкої міді зі сталлю [5]. При взаємодії сталі та латуні не утворюються структури з високою твердістю. Зона підвищеної твердості сталі становить 3...10 мкм. Це дозволяє прогнозувати високі механічні властивості з'єднання та високу надійність виробу при роботі за умов теплових змін.

Межа міцності на зріз з'єднання латунь–сталь, отриманого нагріванням в автовакуумі, становила 194,2 МПа, що перевищує на 32 % нормативне значення (147,1 МПа) [2]. Випробування на статичний вигин двошарового з'єднання плакуючим шаром всередину показало, що з'єднання метал плакуючого та основного шарів відповідають вимогам [6, 2, 16] (вигин до паралельності сторін, тріщини відсутні). Міцність на відрив, яка становила 266,7 МПа, перевищує на 52 % нормативне значення [10] (177,8 МПа після вибухового зварювання і термічної обробки).

Висновки

1. Виконано комплекс інженерних робіт з відпрацювання технології отримання двошарового з'єднання латунь–сталь нагріванням у автовакуумі. Отримані вихідні дані дозволяють розробити виробничий технологічний процес з максимальним використанням існуючого обладнання.

2. Металографічними дослідженнями встановлено високу якість мікроструктури з'єднання.

3. Механічні характеристики виготовленого з'єднання латунь–сталь повністю відповідають вимогам нормативної документації на виробництво трубних ґрат кожухотрубних теплообмінників.

4. Виконана робота є продовженням досліджень взаємодії рідкої міді та її сплавів зі сталлю при нагріванні у автовакуумі. У цій роботі повністю підтверджено механізми взаємодії рідкої і твердої фаз, опубліковані раніше.

Список літератури

1. Колесов С.Н., Колесов И.С. (2007) *Материаловедение и технология конструкционных материалов*. Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. Москва, Высшая школа.
2. Голованенко С.А., Меандров Л.В. (1966) *Производство биметаллов*. Москва, Металлургия.
3. (2003) *Справочник по пайке*. Петрунин И.Е. (ред.). 3-е изд., перераб. и доп. Москва, Машиностроение.
4. ГОСТ 31842-2012. *Теплообменники кожухотрубные. Технические требования*.
5. Серебряник И.П. (2011) *Автовакуумная некапиллярная конструкционная пайка*. Киев, Альфа–Реклама.
6. ГОСТ 19281-89. *Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия*.
7. ГОСТ 15527-2004. *Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки*.
8. Богомолова Н.А. (1978) *Практическая металлография*. М.: Высшая школа, 272 с.
9. Перевезенцев Б.Н., Краснопецев А.Ю., Федоров А.Л. (1991) Исследование испарения цинка при контейнерной пайке медно-цинковыми припоями. *Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Пайка в машиностроении»*, Тольятти.
10. ОСТ 5.9311-78. *Сварка металлов с помощью взрыва. Биметаллические заготовки для трубных решеток теплообменных аппаратов. Общие технические условия*.
11. (1971) *Сварка стальных конструкций*. Сборник «Производство больших конструкций». Вып. 20. Волконский А.И. (ред.). Труды НИИ ТЯЖМАШ «Уралмашзавода».
12. Шмидт М., Курынцев С.В. (2014) Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавленным швом. *Автоматическая сварка*, 4, 47–51.
13. Суворин А.В. (2011) *Электротехнологические установки*. Красноярск, Сибирский федеральный университет.
14. Poleschuk, M.A., Atroshenko, M.G., Puzrin, A.L., Shevtsov, V.L. (2014) Estimation of possibility for producing fuji-strength joint of lange steel parts using the method of autovacuum brazing of threaded profile. *The Paton Welding J.*, 10, 35–37.
15. Вайнерман А.Е. (1981) Механизм межкристаллитного проникновения при наплавке медных сплавов на сталь. *Автоматическая сварка*, 6, 22–29.
16. Serebryanik, I.P., Atroshenko, M.G., Poleschuk, M.A. et al. (2018) Properties of steel-copper bimetal produced by brazing in autonomous vacuum. *The Paton Welding J.*, 5, 12–16.
17. ГОСТ 14019-2003. *Материалы металлические. Метод испытания на изгиб*.

References

1. Kolesov, S.N., Kolesov, I.S. (2007) *Materials science and technology of structural materials*. In: Manual for inst. for higher educ., 2nd Ed., Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
2. Golovanenko, S.A., Meandrov, L.V. (1966) *Production of bi-metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. (2003) *Handbook on soldering*. Ed. by I.E. Petrunin, 3rd Ed., Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. GOST 31842-2012. *Shell-and-tube heat exchangers. Technical requirements* [in Russian].
5. Serebryanik, I.P. (2011) *Autovacuum noncapillary structural brazing*. Kyiv, Alfa-Reclama [in Russian].
6. GOST 19281-89. *Rolled steel with increased strength. General specifications* [in Russian].
7. GOST 15527-2004. *Pressure treated copper zinc alloys (brasses). Grades* [in Russian].
8. Bogomolova, N.A. (1978) *Practical metallography*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
9. Perevezentsev, B.N., Krasnopevtsev, A.Yu., Fedorov, A.L. (1991) Study of zinc evaporation in brazing by copper-zinc braze alloys. In: *Abstr. of Papers of All-Union Sci.-Tech. Conf. on Brazing in Mechanical Engineering*, Tolyatti [in Russian].
10. OST 5.9311-78. *Explosion welding of metals. Bimetallic billets for tube plates of heat exchange apparatuses. General specifications*.

11. (1971) *Welding of steel structures*. In: Production of large structures, Issue 20. Ed. by A.I. Volkonsky. Trudy NPI TyaZhMash, Uralmashzavod [in Russian].
12. Schmidt, M., Kuryntsev, S.V. (2014) Producing of bimetal joints by laser welding with full penetration. *The Paton Welding J.*, **4**, 45-48.
13. Suvorin, A.V. (2011) *Electrotechnological installations*. Krasnoyarsk, SFU [in Russian].
14. Poleschuk, M.A., Atroshenko, M.G., Puzrin, A.L., Shevtsov, V.L. (2014) Estimation of possibility for producing full-strength joint of large steel parts using the method of autovacuum brazing of threaded profile. *The Paton Welding J.*, **10**, 35-37.
15. Vajnerman, A.E. (1981) Mechanism of intercrystalline penetration in surfacing of copper alloys on steel. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 22-29 [in Russian].
16. Serebryanik, I.P., Atroshenko, M.G., Poleshchuk, M.A. et al. (2018) Properties of steel-copper bimetal produced by brazing in autonomous vacuum. *The Paton Welding J.*, **5**, 12-16.
17. GOST 14019-2003. *Metallic materials. Method of bending tests*.

CHARACTERISTICS OF FORMATION AND PROPERTIES OF BRASS-STEEL JOINT PRODUCED BY AUTOVACUUM CLADDING

I.P. Serebryanyk, M.A. Poleshchuk, T.O. Zuber, A.I. Borodin, A.Yu. Tunik, O.A. Los

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

The technological features of producing brass-steel joint by the method of autovacuum heating are considered. The thickness of the brass layer after mechanical treatment was 10 mm. Studying the structures and chemical composition of various joint zones confirmed the solution-diffusion nature of interaction of liquid brass with steel. The measurements of microhardness showed the absence of hard and brittle structures. A high quality of the joint was confirmed by mechanical tests of the two-layer joint on static bending, rupture and shear. 17 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Key words: brass, steel, two-layer joint, autovacuum heating

Надійшла до редакції 11.07.2022

КОНФЕРЕНЦІЯ



ЗВАРЮВАННЯ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА
ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ



м. Київ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
17 листопада 2022 р.

Тематика конференції

- Зварювання та споріднені технології з'єднання та обробки перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, фізико-хімічні процеси при їх реалізації
- Фізична та конструкційна міцність матеріалів, зварних з'єднань і конструкцій, їх діагностика та подовження ресурсу експлуатації
- Автоматизація і роботизація технологій з'єднання та обробки матеріалів, математичне моделювання процесів та інформаційні технології
- Створення нових функціональних та конструкційних матеріалів і технологій їх отримання методами спеціальної електрометалургії
- Нові процеси і технології нанесення покриттів різного призначення та інженерія поверхні
- Матеріали, технології і вироби медичного призначення
- Адитивні технології отримання виробів і елементів конструкцій на основі лазерних, електронно-променевих і дугових джерел енергії
- Технології ремонту та відновлення інфраструктурних і промислових об'єктів.

Контрольні дати

Подання заявок для участі в конференції
(доповідь наживо / on-line доповідь / стендова доповідь / без доповіді)

- | | |
|---|---------------|
| – тез доповідей | до 20.10.2022 |
| – без доповіді | до 10.11.2022 |
| Розсилка програми та збірки тез конференції | до 04.11.2022 |
| Оплата організаційного внеску | до 16.11.2022 |

Організаційний комітет конференції
тел./факс: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/ukr/wtd2022



ВИЩІ ГАРМОНІКИ СТРУМУ В ТРАНСФОРМАТОРНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ З ІМПУЛЬСНИМИ ПРИСТРОЯМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ГОРІННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ

А.М. Жерносеков¹, О.А. Андріанов², С.В. Римар¹, О.Ф. Шатан¹, А.О. Муха¹

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

²Український національний комітет Міжнародної торгової палати. 01054, м. Київ, вул. Рейтарська, 19-Б.

E-mail: office@iccuq.org

Трансформаторні джерела живлення зварювальної дуги змінного струму промислової частоти генерують в живлячу мережу на порядок менший рівень вищих гармонік струму за значенням коефіцієнта загальних гармонійних спотворень, ніж інверторні джерела, при цьому досягається їх висока електромагнітна сумісність з іншим обладнанням мережі живлення, до того ж вони значно простіші в обслуговуванні і більш надійні. Розраховано гармонійний склад струму в процесі зварювання змінним струмом при використанні імпульсних пристроїв стабілізації горіння дуги. Показано, що застосування стабілізуючих імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги, більш переважна ніж полярність імпульсів, яка збігається з полярністю струму дуги. Перевага також спостерігається за ефективністю процесів зварювання і за меншою генерацією вищих гармонік струму. Бібліогр. 18, рис. 7.

Ключові слова: зварювальні джерела живлення, трансформатори, зварювальна дуга, стабілізуючі імпульси, вищі гармоніки струму

Вступ. В останні десятиліття досягнуті великі успіхи в розробці та широкому застосуванні джерел живлення зварювальної дуги інверторного типу з цифровими системами управління і регулюванням форми кривої зварювального струму, однак застосування зварювальної дуги змінного струму промислової частоти все ще залишається затребуваним [1–3]. Дугу змінного струму забезпечують традиційні зварювальні джерела живлення, в яких основним силовим електромагнітним елементом є зварювальний трансформатор. Такі сучасні джерела живлення, оснащені додатковими блоками управління і впливу на зварювальну дугу широко застосовуються в промисловості.

В якості перспективних напрямів використання імпульсних впливів при зварюванні змінним струмом є застосування імпульсних пристроїв стабілізації (ПС) горіння дуги, які поєднуються з традиційними джерелами живлення змінного струму [4, 5]. Застосування даних пристроїв дозволяє знизити напругу холостого ходу трансформаторів та зменшити витрати їх активних матеріалів.

Поки немає єдиного рішення про характер параметрів стабілізуючих імпульсів, таких як енергія імпульсу, час його подачі (інжектування) щодо моменту переходу зварювального струму через нуль, полярність струму. В роботах [3, 6] частково вдалося сформулювати та вирішити цю задачу. Критерієм оптимізації було обрано мінімум напруги холостого ходу джерела живлення, при якому дуга ще стабільно горить, а параметром, який варіюється, служила різниця зміщення фаз між зварюваль-

ним струмом і стабілізуючим імпульсом. На рис. 1 показані визначені залежності мінімальної напруги холостого ходу зварювального трансформатора, при якому горить дуга, від різниці зміщення фаз між зварювальним струмом та стабілізуючим імпульсом, коли полярність стабілізуючого імпульсу збігається з полярністю зварювального струму і коли полярність стабілізуючого імпульсу протилежна полярності зварювального струму. З аналізу отриманих кривих випливає, що залежності мають виражені мінімуми і можна розв'язувати задачу оптимізації. Також видно, що застосування стабілізуючих імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги, має перевагу, оскільки крива мінімальної напруги холостого ходу $U_{x.x.min}$ в цьому випадку знаходиться нижче, ніж при застосуванні імпульсів, що збігається з полярністю зварювального струму. Дано пояснення цього факту: стабілізуючий імпульс спрямований протилежно до зварювального струму, не перешкоджає роботі джерела живлення і сприяє тому, що після закінчення імпульсу джерело живлення працює як стабілізуючий пристрій.

Постановка задачі дослідження. Інверторні джерела живлення для дугового зварювання, маючи гнучкі параметри налаштування, відкривають широкі перспективи їхнього використання. Однак, як показує досвід промислового застосування електрозварювального обладнання, традиційні джерела живлення на базі зварювальних трансформаторів також ще залишаються затребуваними [1, 4]. Це пояснюється насамперед надійністю їх основного силового електромагнітного елементу

Жерносеков А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>, Андріанов О.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4767-3205>,

Римар С.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>, Шатан О.Ф. – <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>,

Муха А.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9810-4569>

© А.М. Жерносеков, О.А. Андріанов, С.В. Римар, О.Ф. Шатан, А.О. Муха, 2022

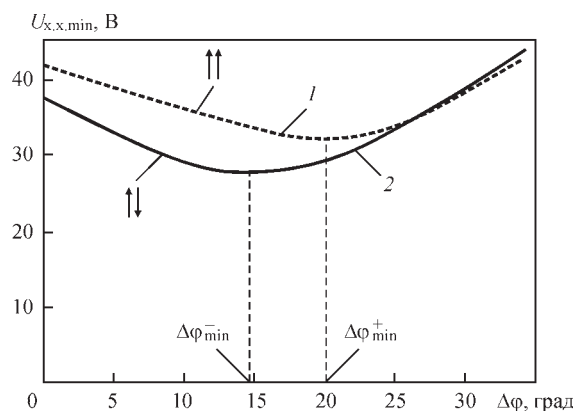


Рис. 1. Залежності мінімальної напруги холостого ходу зварювального трансформатора, при якому горить дуга, від різниці зміщення фаз між зварювальним струмом та стабілізуючим імпульсом: 1 – полярність стабілізуючого імпульсу збігається з полярністю зварювального струму; 2 – полярність стабілізуючого імпульсу протилежна полярності зварювального струму [3, 6]

– трансформатора і тим, що інверторні джерела генерують у мережу живлення значний рівень вищих гармонік струму, мають низьку електромагнітну сумісність [7] і не настільки надійні. Традиційні джерела живлення генерують в живлячу мережу значно менший спектр гармонік [7, 8]. До того ж традиційне обладнання зварювальної дуги змінного струму набагато простіше в обслуговуванні, ніж зварювальні інверторні джерела живлення, які часто живлять дугу постійним струмом. При зварюванні на постійному струмі взаємодія власного магнітного поля дуги та поля зварювального контуру відхиляє дугу внаслідок магнітного дуття, що має край негативні наслідки.

Але питання генерації вищих гармонік струму традиційними зварювальними джерелами живлення змінного струму, оснащених пристроями стабілізації зварювальної дуги, залишається недостатньо дослідженим. Вирішенню цієї задачі присвячені дослідження, наведені в даній статті.

Метою роботи є розрахунок гармонійного складу струму в процесі зварювання змінним струмом традиційними трансформаторними джерелами живлення при використанні імпульсних пристроїв стабілізації горіння дуги і аналіз генерації ними вищих гармонік струму.

Результати досліджень. Удосконалювання традиційних зварювальних джерел живлення йде по шляху зменшення маси зварювального трансформатора. В даних джерелах стабільне запалювання зварювальної дуги, її горіння і стійкість процесу зварювання пов'язані з високими рівнями напруги холостого ходу. Якщо це забезпечується за рахунок напруги зварювального трансформатора, то призводить до суттєвого підвищення його маси. В Інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є.О. Патона цю проблему вирішили в тому числі за рахунок застосування помножувачів напруги [9] або пристроїв стабілізації горіння дуги [10, 11], які дозволяють знизити вторинну напругу трансформатора.

Дослідження впливу схемного рішення й способів регулювання на зовнішні характеристики традиційних трансформаторних джерел живлення, аналіз впливу даних характеристик на стійкість горіння зварювальної дуги, а також дослідження динамічних процесів в електричних колах змінного струму при подачі стабілізуючих імпульсів достатньо повно описано в роботах [3, 6, 12]. Зупинимось тут на знаходженні й аналізі гармонійного складу змінного зварювального струму при різних схемних рішеннях і способах регулювання характеристик традиційних джерел зварювальної дуги.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона накопичено великий досвід по розробці різних типів імпульсних пристроїв стабілізації дуги змінного струму. Застосування таких пристроїв на практиці дозволяє покращувати якість формування зварного шва, збільшувати продуктивність процесу зварювання, сприяти економії електроенергії та надавати можливість застосовувати більш продуктивні режими та недорогі електроди для зварювання постійним струмом [5].

Типова силова частина зварювального джерела живлення змінного струму з імпульсним пристроєм стабілізації горіння дуги. При розробці традиційних джерел живлення доцільно вибрати зварювальні трансформатори з розвинутими магнітними полями розсіювання. Регулювання зварювального струму можна забезпечити конструкцією самого трансформатора, або здійснювати електричними методами, наприклад, за допомогою додаткового реактора, який комутується електронними ключами. Перевага такого способу електричного регулювання полягає в тому, що відбувається живлення зварювальної дуги струмом без нульових пауз.

На рис. 2 наведена електрична схема зварювального джерела живлення з тиристорним регулюванням зварювального струму. Джерело складається зі зварювального трансформатора T_r , дроселя L , підключених паралельно до нього двох зустрічно включених тиристорів VS_1 і VS_2 , пристрою стабілізації горіння дуги ПС, вихід якого підключений до дугового проміжку A . Зварювальний трансформатор T_r налічує три обмотки з кількістю витків w_1 , w_2 , w_3 . Вторинна обмотка w_2 включена послідовно з дроселем L і зварювальною дугою A . Обмотка w_3 живить ПС.

Кожен з тиристорів VS_1 і VS_2 включається зі зміщенням по фазі на кут ψ щодо напруги на обмотці з кількістю витків w_2 . Зміною кута ψ здійснюється регулювання зварювального струму джерела живлення. Під час зварювального процесу величина кута залишається незмінною $\psi = const$.

При проходженні зварювального струму через нуль ПС генерує імпульс струму, що подається на електричну дугу, полегшуючи її повторне запалювання. ПС дозволяє знизити напругу холостого ходу на вторинній обмотці з кількістю витків w_2 зварювального трансформатора T_r в зв'язку із знизженням напруги запалювання дуги.

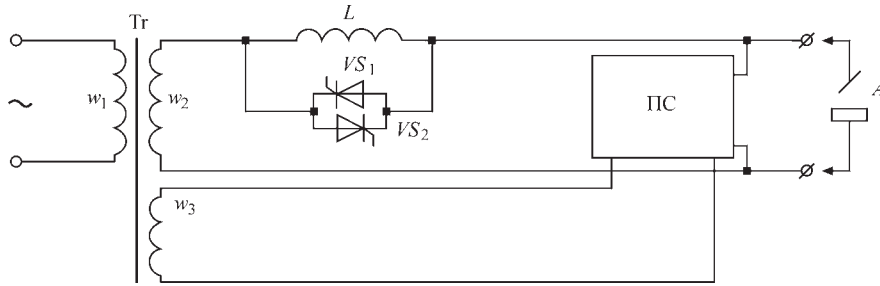


Рис. 2. Електрична схема зварювального джерела живлення з тиристорним регулюванням зварювального струму

Дослідження електромагнітних процесів у джерелах живлення змінного струму з тиристорним регулюванням. Аналіз перехідних процесів у джерелі живлення (рис. 2) при моделюванні зварювальної дуги як проти-ЕРС із напругою на дузі U_A представлено у роботі [6]. Скористаємося цими результатами для того, щоб обчислити спектр гармонік.

На рис. 3 [6] представлена осцилограма струму дуги, напруги на ній і напруги холостого ходу.

Закон зміни зварювального струму на першому етапі з врахуванням того, що при початковій фазі $\varphi_0 = \varphi$ початковий струм дорівнює нулю $I_0 = 0$:

$$i_1(t) = \frac{U_m}{\omega(L_s + L)}(\cos \varphi - \cos \omega t) - \frac{U_A}{\omega(L_s + L)}(\omega t - \varphi), \quad (1)$$

де U_m – амплітудне значення напруги на обмотці з кількістю витків w_2 ; ω – кутова частота; t – час; L_s – індуктивність розсіювання трансформатора.

З формули (1) можна визначити не тільки закон зміни зварювального струму i_1 на ділянці від φ до ψ , але й початкове діюче значення струму I_1 для другого етапу комутації

$$I_1 = \frac{U_m}{\omega(L_s + L)}(\cos \varphi - \cos \psi) - \frac{U_A}{\omega(L_s + L)}(\psi - \varphi). \quad (2)$$

Закон зміни зварювального струму на ділянці від ψ до $\psi + \alpha$ визначається з виразу

$$i_2(t) = \frac{U_m}{\omega L_s}(\cos \psi - \cos \omega t) - \frac{U_A}{\omega L_s}(\omega t - \psi) + I_1. \quad (3)$$

Очевидно, що в момент часу, коли струм i_2 стає рівним I_1 , скінчується ділянка тривалістю $\omega t = \alpha$. Дорівнявши вираз для струму i_2 у момент часу $\psi + \alpha$ до значення I_1 (формули (2) і (3)), отримаємо рівняння для визначення тривалості комутації α

$$\frac{U_A}{U_m} \alpha = \cos \psi - \cos(\psi + \alpha). \quad (4)$$

Після запирання відповідного тиристора (VS_1 і VS_2), починаючи з моменту часу $\psi + \alpha$, закон зміни зварювального струму описується виразом

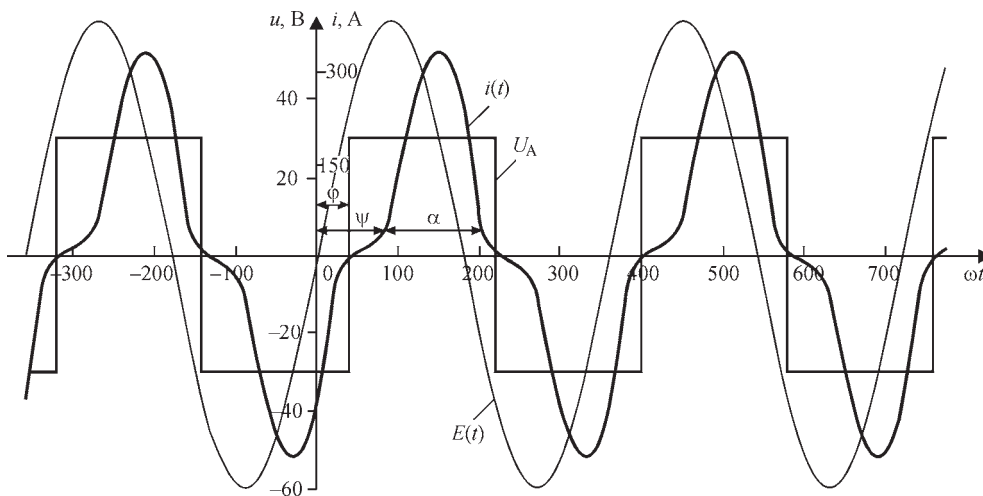
$$i_3(t) = \frac{U_m}{\omega(L_s + L)}[\cos(\psi + \alpha) - \cos \omega t] - \frac{U_A}{\omega(L_s + L)}[\omega t - (\alpha + \psi)] + I_1. \quad (5)$$

Видно, що праві частини формул (1) і (5) тотожні, тому для полегшення подальших обчислень будемо користуватися останньою.

Знаючи струми i_1 , i_2 , i_3 , а також часові інтервали їхнього протікання й задаючись кутом включення тиристорів VS_1 і VS_2 , визначимо вираз для зварювального струму на напівперіоді

$$i(t) = \begin{cases} i_1(t), & \varphi < \omega t < \psi; \\ i_2(t), & \psi < \omega t < \psi + \alpha; \\ i_1(t), & \psi + \alpha < \omega t < \pi. \end{cases} \quad (6)$$

Визначивши часові залежності струмів на трьох етапах комутації (рис. 3), можна знайти гармонійний склад зварювального струму

Рис. 3. Часові залежності струму дуги i , напруги на ній U_A і напруги холостого ходу E

$$i(t) = \sum_h^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)], \quad (7)$$

де h – номер гармоніки; коефіцієнти

$$a_h = \left[1 + (-1)^h \right] \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} i(t) \cos(h\omega t) dt ;$$
$$b_h = \left[1 + (-1)^h \right] \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} i(t) \sin(h\omega t) dt , \quad (8)$$

а модуль струму

$$|i_h| = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} . \quad (9)$$

На рис. 4, а показано гармонійний склад зварювального струму $|i_h|$ при живленні дуги змінним струмом (дуга як проти-ЕРС). З рисунку видно, що парні гармоніки струму відсутні.

Коефіцієнт загальних гармонійних спотворень THD_i (Total Harmonics Current Distortion [13]) визначається за формулою

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} |i_h|^2}}{|i_1|} . \quad (10)$$

Результат збігається з отриманим раніше в роботі [14] методом гармонійного балансу.

Аналіз стійкості горіння дуги змінного струму і моделювання її динаміки. Проведемо дослідження впливу стабілізуючих імпульсів на горіння зва-

рювальної дуги. Особливість цього дослідження, в основі якого лежить метод математичного моделювання, полягає у виборі динамічної моделі зварювальної дуги. Модель зварювальної дуги у вигляді проти-ЕРС, що використалася вище, для дослідження динамічних процесів в електричних колах з дугою непридатна, тому що по своїй суті є статичною.

Узагальнена математична модель динамічної дуги [15, 16] розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, найбільш адекватно описує динаміку електричної дуги як елемента електричного кола. Вона враховує не тільки нелінійність статичної вольт-амперної характеристики, але й термічну інерційність стовпа дуги. Саме термічні процеси, і в першу чергу процес іонізації-деіонізації, впливають на провідність плазми стовпа дуги. Стовп дуги змінного струму частотою 50 Гц при кожній зміні полярності встигає деіонізуватися, що вимагає підвищеної напруги для підтримки розряду. Якщо джерело живлення не може забезпечувати необхідну напругу, дуга гасне.

Розглянемо електричне коло (без підключення імпульсного стабілізатора), що зображене на рис. 5 і являє собою спрощену схему силової частини традиційних зварювальних джерел живлення змінного струму, підключену до дуги A . Система диференціальних рівнянь, які описують це коло, складається з рівняння Кирхгофа й рівняння узагальненої математичної моделі динамічної дуги

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_A = E(t); \quad \theta \frac{di_0^2}{dt} + i_0^2 = i_A^2, \quad (11)$$

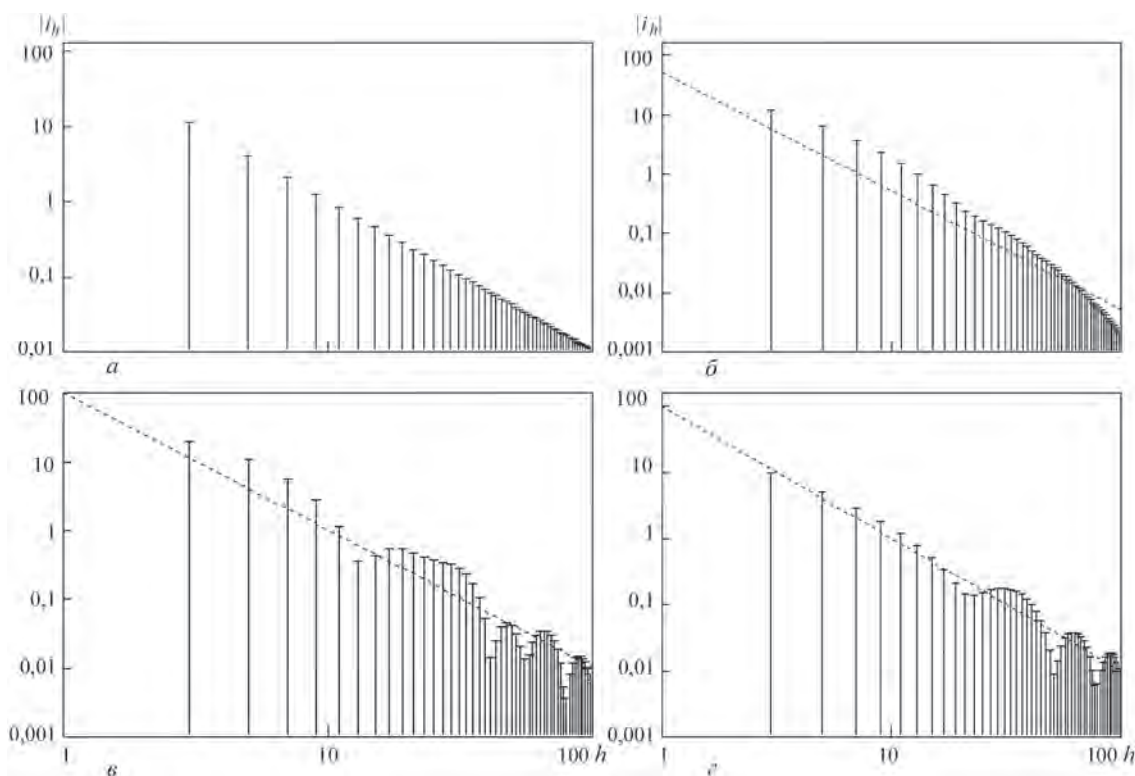


Рис. 4. Гармонійний склад зварювального струму $|i_h|$ при живленні дуги змінним струмом: дуга як проти-ЕРС (а); динамічна модель зварювальної дуги (б); дуга зі стабілізуючими імпульсами, коли полярність імпульсу збігається з полярністю струму дуги (в); полярність імпульсу протилежна полярності струму дуги (з): а – $\text{THD}_i = 9,1 \%$; б – 9,2; в – 15,7; з – 7,4

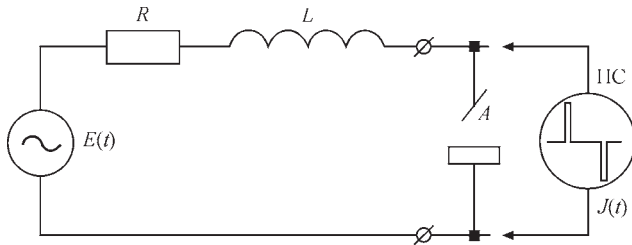


Рис. 5. Спрощена схема силової частини традиційних зварювальних джерел живлення змінного струму

де i – струм реактора L і резистора R ; $E(t)$ – напруга джерела живлення, у загальному випадку має вигляд $E(t) = U_m \sin(\omega t - \varphi)$; U_m – амплітуда напруги холостого ходу; φ – кут зміщення фаз; i_0 – струм статичного стану дуги; θ – характерний час (постійна часу дуги); i_A – струм дуги.

Для знаходження гармонійного складу зварювального струму скористаємося результатами роботи [6] і послідовністю дій по вирішенню системи рівнянь (11).

На рис. 6, а [6] представлені результати моделювання, з яких видно, що форма напруги на дузі має яскраво виражені піки запалювання на кожному напівперіоді, які перевищують напругу на дузі. Підвищена напруга забезпечується як наявністю індуктивності, так і фазовим зміщенням між струмом дуги й напругою джерела живлення.

Знаючи часові залежності струму, можна одержати його гармонійний склад (див. рис. 4, б). Хоча цей спектр гармонік відрізняється від спектра, отриманого при моделюванні дуги як проти-ЕРС (порівняно з рис. 4, а), коефіцієнт спотворень THD_1 практично не розрізняється.

Один з варіантів стабілізації дуги імпульсами струму, які подаються від додаткового джерела живлення, показує рис. 5 при приєднаному імпульсному джерелі струму ПС. Система диференціальних рівнянь, що описує перехідні процеси на етапі імпульсу, виходить із системи (11), якщо струм дуги [3, 6]

$$i_A = i + J(t) = i + J_m \sin \Omega t, \quad (12)$$

де J_m і Ω – амплітуда й частота імпульсів струму.

Як видно з рис. 6, б [6] додаткові імпульси знижують напругу на дузі, яка майже не змінюється протягом напівперіоду змінного струму.

При зміні параметрів імпульсів струму й параметрів основного джерела живлення можна досліджувати стійкість системи. У комп'ютерних математичних пакетах є процедури для інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь. Однак ці процедури забезпечують безперервне інтегрування й не пристосовані для інтегрування систем, праві частини яких різні на різних інтервалах часу. Безпосереднє застосування їх неможливо. Потрібна доробка, модифікація й адаптація їх для задач подібного класу. Опишемо методику, що застосовувалася при цих дослідженнях.

Існує модифікований метод стрільби й метод багаторазової стрільби для одержання періодичних рішень в автономних електричних колах з дугою [17], який можна застосовувати до неавтономних кіл з дугою. Досвід роботи [6] показав, що зведення задачі Коші до крайової задачі з умовами зшивки напівперіоду на рівні I і I_0

$$i\left(0, \frac{\pi}{\omega}, I, I_0\right) = -I; \quad i_0\left(0, \frac{\pi}{\omega}, I, I_0\right) = I_0 \quad (13)$$

є не виправдано громіздким і вимагає потужної обчислювальної техніки (тут $i(t_0, t, I, I_0)$ і $i_0(t_0, t, I, I_0)$ формальне позначення рішення досліджуваної нами системи). Пояснюється це необхідністю додаткового рішення варіаційної задачі.

Деякі комп'ютерні математичні пакети, наприклад, MathCAD, дозволяють формально записувати умови зшивки на напівперіоді й вирішувати отримані рівняння без залучення варіаційних методів. Рівняння для зшивки при нульовому струмі виглядають наступним чином:

$$i\left(\varphi, \frac{\pi}{\omega}, 0, I_0\right) = 0; \quad \left(\varphi, \frac{\pi}{\omega}, 0, I_0\right) = I_0. \quad (14)$$

тут I_0 і φ – невідомі, що підлягають визначенню.

Саме цей шлях, через його простоту, є перспективним при застосуванні його результатів для гармонійного аналізу.

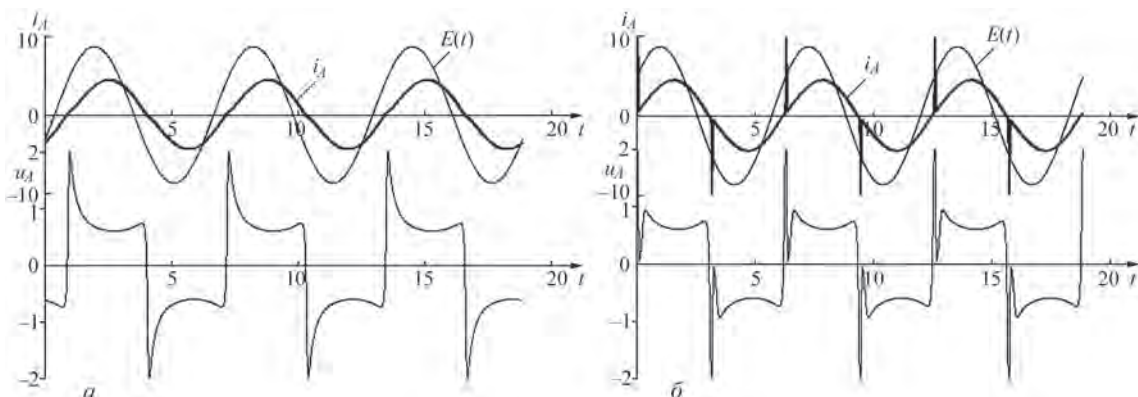


Рис. 6. Часові залежності струму дуги i_A , напруги на ній U_A і напруги холостого ходу E , отримані в результаті моделювання: а – без імпульсів струму; б – з імпульсами струму

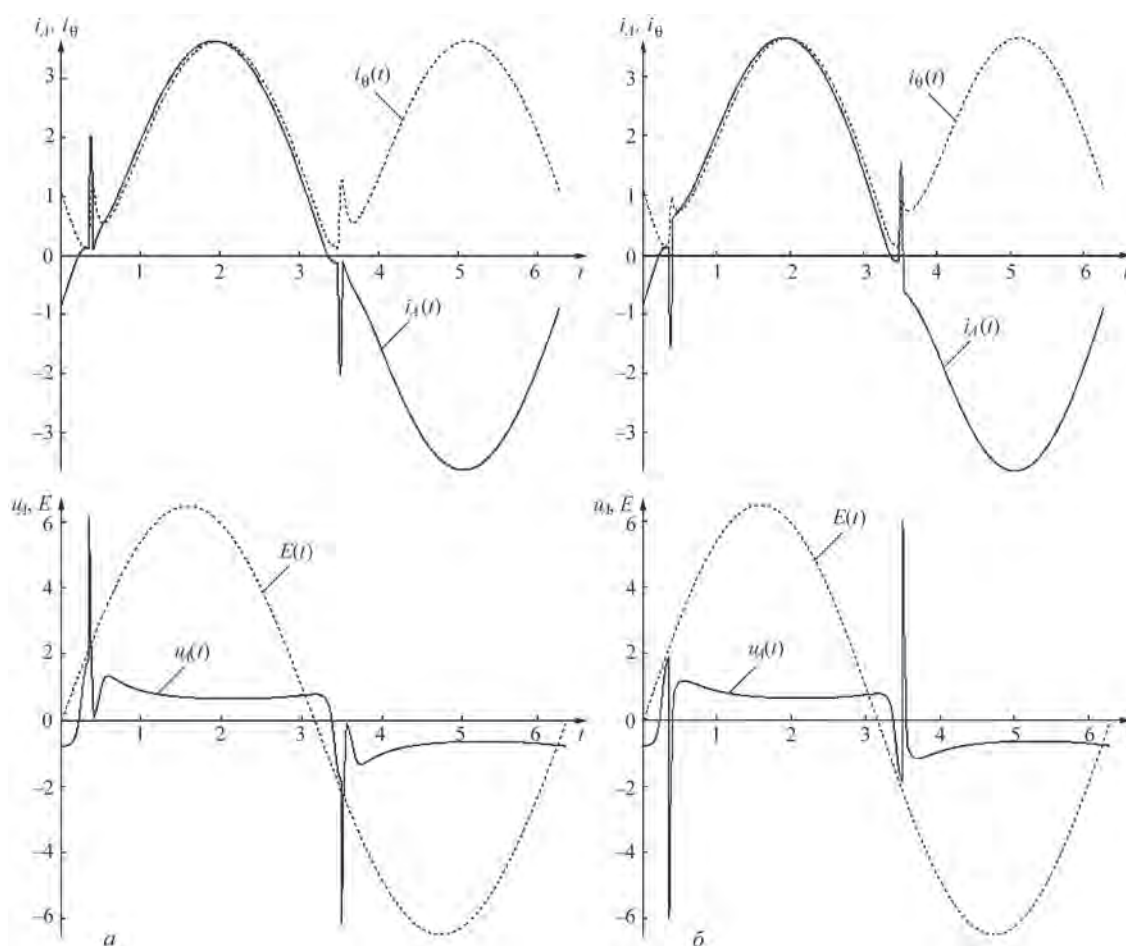


Рис. 7. Часові залежності струмів і напруги у джерелі живлення зі стабілізуючими імпульсами: полярність імпульсу збігається з полярністю струму дуги (а); полярність імпульсу протилежна полярності струму дуги (б)

Гармонійний аналіз режимів стабілізації. На рис. 7 показані часові залежності струмів і напруги у джерелі живлення зі стабілізуючими імпульсами [3, 6], одержані по наведеним вище формулам, які досить добре збігаються з осцилограмами, отриманими експериментально [5]. Рис. 7, а відображає випадок, коли полярність імпульсу збігається з полярністю струму дуги, а рис. 7, б, коли полярність імпульсу протилежна полярності струму дуги.

По цим часовим залежностям струму по формулам (8) і (9) одержано його гармонійний склад, показаний на рис. 4, в, г. На рис. 4, в наведено гармонійний склад струму в джерелі живлення зі стабілізуючими імпульсами, коли полярність імпульсу збігається з полярністю струму дуги, а на рис. 4, г, коли полярність імпульсу протилежна полярності струму дуги.

Як було сказано вище, кращим є режим, коли полярність стабілізуючого імпульсу протилежна полярності зварювального струму [3, 6]. Його технологічна ефективність підтверджена в роботі [18]. Порівняння рис. 4, а, б, г демонструє, що застосування такого режиму є більш перспективним ще й з погляду електромагнітної сумісності. Рівень вищих гармонік з $\text{THD}_i = 7,4\%$ менше ніж рівень з $\text{THD}_i = 9,1$ і $9,2\%$ для джерел живлення без стабілізаторів горіння зварювальної дуги.

Висновки

1. Одним із перспективних напрямів застосування імпульсних впливів при зварюванні змінним струмом є використання імпульсних пристроїв стабілізації горіння дуги у поєднанні з трансформаторними джерелами живлення змінного струму.

2. Застосування стабілізуючих імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги, більш переважна. При цьому можливо одержати мінімальні масогабаритні показники джерела живлення та досягти високої електромагнітної сумісності за рахунок низького рівня вищих гармонік, що генерується у мережу живлення.

3. Отримане значення сумарного коефіцієнта нелінійних спотворень струму нижче за існуючі стандарти на якість електроенергії. Це відкриває перспективу модернізації існуючих і створення нових конкурентоспроможних джерел живлення на базі зварювальних трансформаторів з імпульсною стабілізацією зварювальної дуги.

Список літератури

1. Заруба И.И., Андреев В.В., Дыменко В.В. (2001) Усовершенствование трансформаторов для ручной дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, 3, 45–48.
2. Кидзи И., Кобаяси К., Исии Д., Ямаока Х. (2003) Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение. *Там же*, 10–11, 59–63.

References

3. Андрианов А.А., Сидорец В.Н. (2009) Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока. *Електротехніка і електромеханіка*, **2**, 5–12.
4. Патон Б.Е., Заруба И.И., Дыменко В.В., Шатан А.Ф. (2006) Снижение материалоемкости источников питания и потребления электроэнергии при сварке. *Автоматическая сварка*, **10**, 20–29.
5. Патон Б.Е., Заруба И.И., Дыменко В.В., Шатан А.Ф. (2007) *Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги*. Київ, Екотехнологія.
6. Андрианов О.А. (2010) *Оптимізація процесу стабілізації зварювання корозійностійких сталей змінним струмом*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 05.03.06. Київ, Нац. техн. ун-т України «Київський політехн. ін-т».
7. Рымар С.В., Жерносеков А.М., Сидорец В.Н. (2011) Влияние однофазных источников питания сварочной дуги на электрическую сеть. *Автоматическая сварка*, **12**, 9–15.
8. Рымар С.В., Жерносеков А.М., Сидорец В.Н. (2011) Влияние сварочных источников питания на трехфазную электрическую сеть. *Там же*, **10**, 49–55.
9. Пентегов И.В., Латанский В.П., Склифос В.В. (1992) *Малогабаритные источники питания с улучшенными энергетическими показателями. Новые сварочные источники питания*. Сб. науч. тр. Киев, АН Украины, ИЭС им. Е.О. Патона, 66–71.
10. Заруба И.И., Дыменко В.В., Кухарский В.Я. (1991) Применение многостовых источников переменного тока для дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, **2**, 59–63.
11. Пентегов И.В., Дыменко В.В., Склифос В.В. (1994) Сварочные источники питания с импульсным поджигом дуги. *Там же*, **7–8**, 36–39.
12. Сидорец В.Н., Андрианов А.А. (2007) Методы анализа режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск*. Силовая електроніка та енергоефективність, **5**, 71–74.
13. Paice, D.A. (1995) *Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse Methods for Clean Power*. NY, IEEE PRESS.
14. Сидорец В.Н., Кункин Д.Д., Москович Г.Н. (2011) Гармонический анализ переменного тока электрической сварочной дуги. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск*. Силовая електроніка та енергоефективність, **1**, 219–222.
15. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. (1988) Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги. *Автоматическая сварка*, **11**, 36–40.
16. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. (2013) *Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка».
17. Сидорец В.Н. (2006) Метод многократной стрельбы для исследования бифуркаций динамических систем. *Електронне моделювання*, **4** (28), 3–13.
18. Шатан А.Ф., Андрианов А.А., Сидорец В.Н., Жерносеков А.М. (2009) Эффективность стабилизации дуги переменного тока при сварке покрытыми электродами. *Автоматическая сварка*, **3**, 31–33.
1. Zaruba, I.I., Andreev, V.V., Dymenko, V.V. (2001) Improvement of transformers for manual arc welding. *The Paton Welding J.*, **3**, 43–46.
2. Kiji, N., Kobayashi, K., Ishii, J., Yamaoka, H. (2003) Development of high efficiency arc welding methods. *The Paton Welding J.*, **10–11**, 56–60.
3. Andrianov, A.A., Sidorets, V.N. (2009) Optimization of modes for stabilization of alternating-current welding arc. *Elektrotehnika i Elektromechanika*, **2**, 5–12 [in Ukrainian].
4. Paton, B.E., Zaruba, I.I., Dymenko, V.V., Dymenko, V.V., Shatan, A.F. (2006) Lowering of material content of power sources and power consumption in welding. *The Paton Welding J.*, **10**, 15–23.
5. Paton, B.E., Zaruba, I.I., Dymenko, V.V., Dymenko, V.V., Shatan, A.F. (2007) *Welding power sources with pulse stabilization of arc burning*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
6. Andrianov, O.A. (2010) Optimization of welding stabilization process of corrosion-resistant steels by alternating current. In: *Syn of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
7. Rymar, S.V., Zhernosekov, A.M., Sidorets, V.N. (2011) Effect of single-phase power sources of welding arc on electric mains. *The Paton Welding J.*, **12**, 7–12.
8. Rymar, S.V., Zhernosekov, A.M., Sydorets, V.N. (2011) Influence of welding power sources on three-phase mains. *The Paton Welding J.*, **10**, 40–45.
9. Pentegov, I.V., Latansky, V.P., Sklifos, V.V. (1992) *Small-sized power sources with improved power indices*. Kyiv, PWI, 66–71 [in Russian].
10. Zaruba, I.I., Dymenko, V.V., Kukharsky, V.Ya. (1991) Application of multioperator alternating-current power sources for arc welding. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 59–63 [in Russian].
11. Pentegov, I.V., Dymenko, V.V., Sklifos, V.V. (1994) Welding power sources with pulse arc ignition. *Avtomatich. Svarka*, **7–8**, 36–39 [in Russian].
12. Sidorets, V.N., Andrianov, A.A. (2007) Methods of analysis of stabilization modes of alternating-current welding arc. *Tekhnichna Elektrodynamika. Sylova Elektronika ta Energoefektyvnist*, **5**, 71–74 [in Russian].
13. Paice, D.A. (1995) *Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse Methods for Clean Power*. NY, IEEE PRESS.
14. Sidorets, V.N., Kunkin, D.D., Moskovith, G.N. (2011) Harmonic analysis of alternating current of electric welding arc. *Tekhnichna Elektrodynamika. Sylova Elektronika ta Energoefektyvnist*, **1**, 219–222, [in Russian].
15. Pentegov, I.V., Sidorets, V.N. (1988) Energy parameters in mathematical model of dynamic welding arc. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 36–40 [in Russian].
16. Sidorets, V.N., Pentegov, I.V. (2013) Deterministic chaos in nonlinear circuits with electric arc. Kyiv, IAW [in Russian].
17. Sidorets, V.N. (2006) Method of multiple shooting for the study of bifurcations of dynamical systems. *Elektronnoe Modelirovanie*, **4** (28), 3–13 [in Russian].
18. Shatan, A.F., Andrianov, A.A., Sidorets, V.N., Zhernosekov, A.M. (2009) Efficiency of stabilisation of the alternating-current arc in covered-electrode welding. *The Paton Welding J.*, **3**, 21–23.

HIGHER CURRENT HARMONICS IN TRANSFORMER POWER SOURCES WITH PULSED DEVICES OF WELDING ARC STABILIZATION

A.M. Zhernosekov¹, O.A. Andrianov², S.V. Rymar¹, O.F. Shatan¹, A.O. Mukha¹

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Ukrainian National Committee of International Chamber of Commerce (ICC Ukraine). 19B, Reitarska St. 01034, Kyiv.

E-mail: office@iccuq.org

Transformer power sources of welding arc of industrial frequency alternating current generate into the mains the level of higher current harmonics, which is by an order of magnitude lower by the value of the coefficient of general harmonic distortion, than that of the inverter power sources. Here, their high electromagnetic compatibility with other equipment of the mains is achieved. Moreover, they are much easier to maintain and more reliable. Harmonic composition of current during a.c. welding was calculated at application of pulsed devices of arc stabilization. It is shown that application of stabilizing pulses with the polarity opposite to that of arc current, is more advantageous than the use of pulses with the polarity coinciding with that of arc current. Advantages as to welding process effectiveness and smaller generation of higher current harmonics are also observed. 18 Ref., 7 Fig.

Keywords: welding power sources, transformers, welding arc, stabilizing pulses, higher current harmonics

Надійшла до редакції 10.07.2022

НАНЕСЕННЯ КЕРАМІЧНОГО ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНЮ ПОРИСТОЇ МАТРИЦІ ІНФРАЧЕРВОНОГО ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА

О.В. Колісніченко, Ю.М. Тюрін, М.А. Полещук

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

Запропоновано технологію нанесення керамічного покриття на поверхню фехралевої пористої матриці для покращення технічних характеристик інфрачервоних пальників. Багатокамерний детонаційний пристрій дозволяє формувати покриття на робочій поверхні без істотної зміни її поверхневої проникності. Наявність керамічного покриття з Al_2O_3 на стінках пор змінює режим горіння. Фронт полум'я переміщується в матрицю на невелику глибину за плівку покриття, що приводить до зниження шкідливих викидів при згорянні пальної суміші: чадного газу максимально на 50 %, оксиду азоту на 10...15 %. Ефективність випромінювання матриці збільшується до 2 разів у спектральному інфрачервоному діапазоні довжини хвиль від 5 до 14 мкм. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: пористі металеві матриці, інфрачервоне випромінювання, детонаційне напilenня, керамічне покриття, шкідливі викиди, ефективність випромінювання

Вступ. Використання пористих матеріалів у побуті й техніці обумовлено їхніми унікальними властивостями. Наприклад, пористі металеві матриці мають малу вагу в поєднанні з високою міцністю, що дозволяє їх використовувати в легких конструкційних елементах, акустичній ізоляції, системі поглинання енергії та віброгасниках [1]. Вони також мають велику площу внутрішньої поверхні та високу теплопровідність, і тим самим ідеально підходять для використання у якості теплообмінників, тепловідводів, котлів, пальників і реакторів для виробництва синтез-газу. Висока проникність пористих матеріалів для потоку газу та їхня велика площа поверхні забезпечують високу швидкість теплопередачі за низьких перепадів тиску. Наразі завдяки високій ефективності інтенсивно розвивається виробництво та використання інфрачервоних (ІЧ) газових пальників, які застосовуються у багатьох технологічних і побутових пристроях. В них значна частина енергії від нагрівача передається до об'єкта, що нагрівається, завдяки випромінюванню. Робота ІЧ пальника базується на повному окисненні попередньо створеної газоповітряної суміші на проникній матриці, яка при нагріванні випромінює теплову енергію в ІЧ діапазоні. Горіння газових сумішей на поверхні пористої матриці відбувається за більш низької температури порівняно з факельним спалюванням газу через сильне тепловідведення із зони хімічного перетворення в тіло матриці. Основні характеристики пальників цього типу – щільність потоку випромінювання і, що особливо важливо для побутових приладів, низька кількість токсичних газів у продуктах згорання. Для підвищення ефективності ІЧ пальників дуже важ-

ливо забезпечити повноту згорання газової суміші й відповідно зниження оксиду вуглецю завдяки збільшенню часу перебування продуктів згорання в зоні високих температур. Це може бути досягнуто шляхом застосування радіаційних екранів у вигляді сітки або перфорованих пластин над поверхнею матриці, а також методом спалювання газу в глибокій порожнині матриці, тобто переходом від топографії плоскої матриці до об'ємної [2]. Теплопровідні елементи також використовують у вигляді пластин, що лежать на поверхні або тих, що проникають у тіло матриці [3]. Така конструкція ІЧ пальника дозволяє збільшувати попереднє нагрівання газової суміші під час руху крізь проникну матрицю і температуру поверхні матриці. Теплопровідні пластини (рекуператори) виокремлюють із продуктів згорання і передають до поверхні й у тіло матриці додатковий тепловий потік унаслідок теплопровідності, а також забезпечують додаткове радіаційне нагрівання випромінюванням від поверхонь теплопровідних елементів, які розміщені в області продуктів згорання. Покриття поверхні матриці матеріалом з іншими теплофізичними властивостями також змінює енергетичні й екологічні характеристики пальникового пристрою. Крім того, він може використовуватися як додатковий захід щодо конструкційних способів збільшення ефективності ІЧ пальників. Метою цієї роботи було відпрацювання технології нанесення і вивчення структури, властивостей щільного керамічного шару на поверхні пористої матриці газового пальника, а також випробування газових пальників з керамічним покриттям, визначення ефективності зниження виділення шкідливих домішок і збільшення коефіцієнта корисної дії.

Колісніченко О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4507-9050>, Тюрін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7901-7395>, Полещук М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-5992-4641>

© О.В. Колісніченко, Ю.М. Тюрін, М.А. Полещук, 2022

Обладнання, матеріали та методики дослідження. Об'єктом дослідження була пориста матриця розміром 250×250×10 мм із фехралевого сплаву, об'ємною пористістю $\eta_v \approx 0,9$, поверхневою проникністю $\eta = 0,4$ і середнім діаметром пор 0,5...0,8 мм. Матеріалом покриття обрано оксид алюмінію, максимальна температура застосування якого 1650 °С, що є більшою за температуру нагрівання пористої матриці в процесі роботи. Покриття на робочій поверхні та у порах матриці формували із порошку AMPERIT® 740.0 Al_2O_3 (рис. 1) фірми H.C.Starck (фракція 5,6...22,5 мкм) методом детонаційного напилення. Для цього використовували багатокамерний детонаційний пристрій (БКДП), розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [4]. Дослідження з оптимізації режимів нанесення керамічного покриття проводили на автоматизованому обладнанні (рис. 2), що складається із БКДП, маніпулятора, стандартного газового пульта низького тиску (до 3 атм) для подачі кисню, пропану й повітря, порошкового живильника скребкового типу SX-03-2 фірми Guangzhou Sanxin Metal S&T Co., Ltd. (Китай), автоматизованої системи управління технологічним процесом.

Одним із ключових параметрів, що визначають фізико-хімічні процеси взаємодії матеріалів і саму можливість формування якісних покриттів,

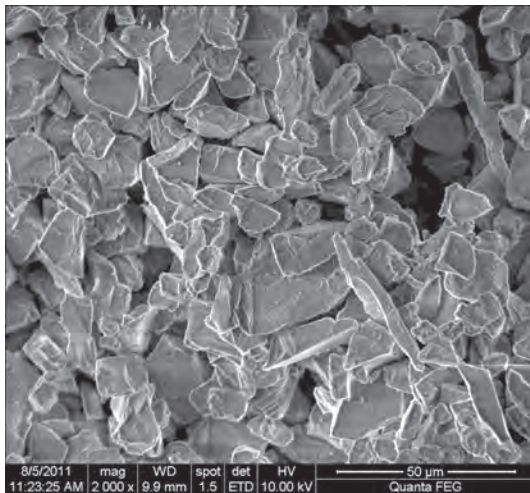


Рис. 1. Вид порошку AMPERIT® 740.0 Al_2O_3 на PEM Quanta 600 FEG, прискорююча напруга 10 кВ

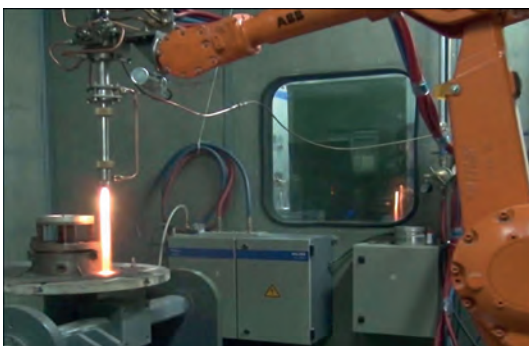


Рис. 2. Пристрій для нанесення покриттів з використанням БКДП

є швидкість і температура порошинки в момент зіткнення з підкладкою. З цією метою в БКДП реалізується режим перетисненого детонаційного горіння газової суміші в спеціально спрофільованих камерах. Акумуляція енергії згоряння від двох камер у циліндричному стволі забезпечує утворення високошвидкісного струменя продуктів детонації, який прискорює і нагріває напилюваний порошок. При цьому швидкість порошку, наприклад Al_2O_3 , досягає 1000 ± 200 м/с [5]. Нанесення покриттів газотермічними методами на тонкостінні деталі – складне завдання через великий тепловий вплив на поверхню. Це може призводити до інтенсивного перегріву, окиснення напилюваних поверхонь, і, як наслідок, зниження адгезії, а зазвичай і руйнування самого виробу. Циклічність процесу є однією з переваг детонаційного методу, що дозволяє знизити температуру зони напилення. Для додаткового охолодження виробу була реалізована повітряна продувка ($6 \text{ м}^3/\text{год}$) через усю тильну поверхню пористої матриці. Подача газів і порошку відбувалася безперервно. Частота слідування детонації становила 16 Гц, витрати порошку – $0,6 \text{ кг}/\text{год}$, швидкість поздовжнього переміщення БКДП відносно виробу – $50 \text{ мм}/\text{с}$. Склад і витрати компонентів горючої газової суміші наведено в табл. 1.

Дослідження мікроструктури і елементного складу шару кераміки Al_2O_3 проводили за допомогою растрових електронно-іонних мікроскопів Quanta 200 3D і Quanta 600 (PEM), оснащених енергодисперсійним спектрометром рентгеновського випромінювання системи PEGASUS фірми EDAX. Пористість визначали металографічним методом з елементами якісного і кількісного аналізів геометрії пор із застосуванням оптичного інвертованого мікроскопа Olympus GX51. Дослідження твердості керамічного шару і підкладки проводили за допомогою автоматизованої системи аналізу мікротвердості DM-8 за методом мікроВіккерса при навантаженні на індентор 25 г.

Результати та їх обговорення. Газотермічні методи напилення ефективно використовують для створення непроникного поверхневого шару на пористих матрицях теплообмінників [6, 7]. На відміну від теплообмінників покриття на ІЧ пальниках

Таблиця 1. Склад і витрати компонентів горючої газової суміші

Компоненти горючої суміші	Витрати газів, $\text{м}^3/\text{год}$
1-а камера	
O_2	3,9
Повітря	0,1
C_3H_8	0,71
2-а камера	
O_2	3,6
Повітря	0,11
C_3H_8	0,66

має зберегти відкриту пористість. Як зазначалося вище, ще одна проблема, з якою доводиться стикатися в процесі газотермічного напilenня покриттів на тонкостінні й ажурні вироби, – це великий тепловий потік, що призводить до перегріву виробу. Проведено серію експериментів з визначення впливу дистанції напilenня на процес осадження керамічного покриття на пористій матриці. Дистанцію змінювали в межах 100...200 мм при незмінних інших технологічних параметрах. На відстані до 200 мм швидкість порошку досягає максимального значення за незначного зменшення максимальної температури нагрівання порошинки [8]. На великих дистанціях температура і швидкість продуктів згоряння також знижуються, що призводить до зменшення газодинамічного і теплового впливу на тонкі стінки пор матриці. В результаті проведених експериментів встановлено, що при заданих технологічних параметрах напilenня БКДП і додаткового повітряного охолодження мінімальна відстань від зрізу сопла до поверхні, при якому не відбувається руйнування і перегрів матриці, становить 180 мм. Нанесення керамічного покриття на пористу матрицю здійснювали з шестиразовим перекриттям доріжок напilenня. Зовнішній вид виробу з покриттям представлено на рис. 3.

При напilenні покриття повторює рельєф поверхні та не знижує поверхневу проникність матриці (рис. 4, *a*). Товщина покриття на поверхні матриці становить в середньому 100 мкм. На поперечному зламі матриці помітно, що внаслідок відбиття від перетинок покриття формується не лише на поверхні, а й на стінках приповерхневих пор матриці та досягає товщини 20 мкм.

Мікротвердість шару кераміки становить $1320 \pm 25 \text{ HV}_{0.025}$, пористість нижче 2 %. Значення вимірів мікротвердості по шару мають малу розбіжність, що свідчить про однорідність шару деформованих порошинок, які щільно прилягають, так і про його фазову й структурну однорідність. Покриття прилягає до матриці без дефектів і відшарувань. З огляду на високотемпературні умови (вище ніж 1400...1450 °C) формування на тонких стінках пор покриття із Al_2O_3 можна стверджувати, що його фазовий склад представлено переважно $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ модифікацією [9]. Елементний склад матеріалу матриці й покриття, визначений методом аналізу спектрів характеристичного рентгенівського випромінювання (рис. 5), наведено в табл. 2. Теплопровідність покриття Al_2O_3 в робочому температурному діапазоні ІЧ пальника (до 1300 °C) становить в середньому 6 Вт/(м·К), а фехралевого

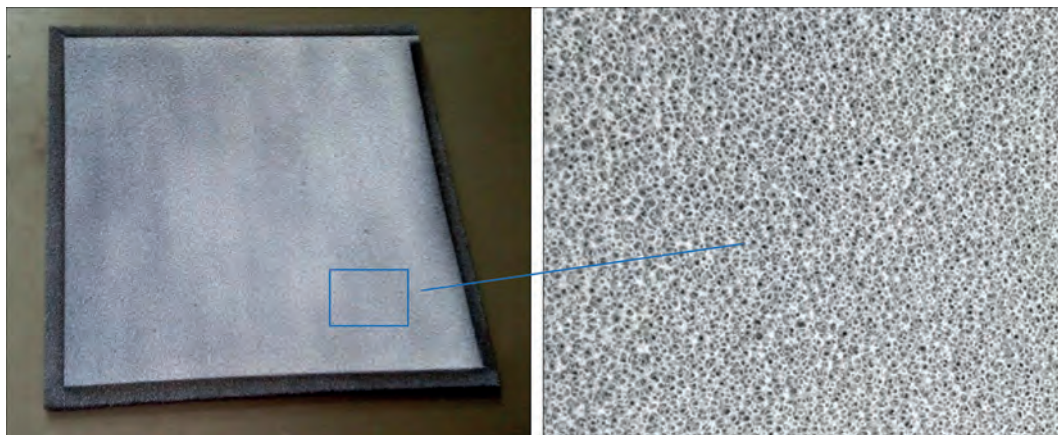


Рис. 3. Пориста матриця з покриттям

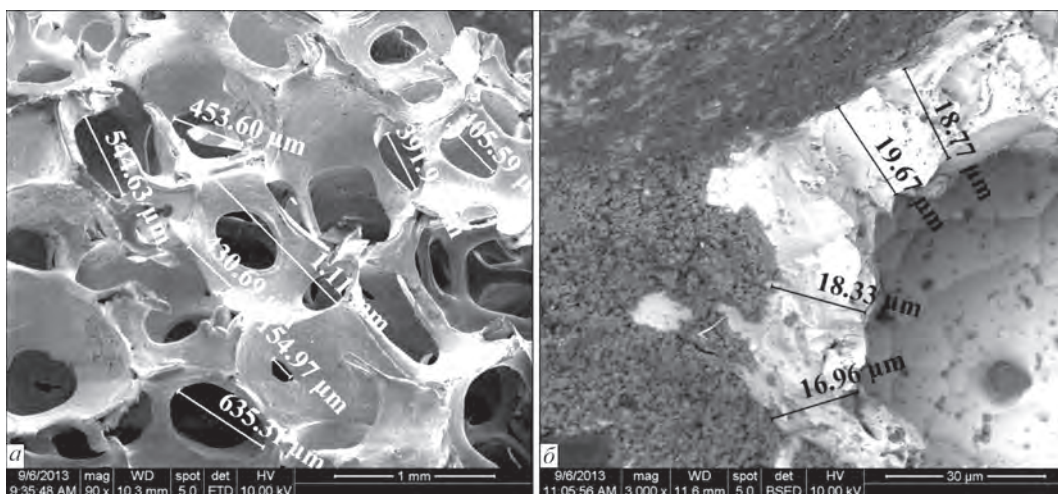


Рис. 4. Матриця після напilenня: *a* – вид пор на поверхні; *б* – покриття на стінках пор на глибині 2 мм від поверхні матриці

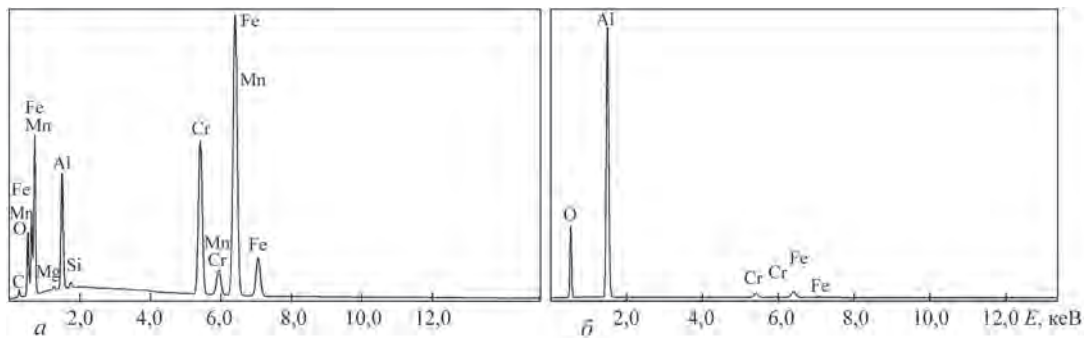


Рис. 5. Спектр характеристичного рентгенівського випромінювання матеріалу матриці (а) і покриття (б)

Таблиця 2. Елементний склад пористої матриці та покриття, мас. %

Елемент	Пориста матриця	Покриття
O	3,57	33,53
Al	9,25	59,27
Cr	20,69	2,43
Fe	64,11	4,78
Mn	1,28	
Mg	0,34	
C	0,37	
Si	0,39	

матеріалу пористої матриці – 16 Вт/(м²·К). Різниця в теплопровідності, як показано нижче, впливає на сам процес горіння горючої суміші.

Випробування пористих матриць з покриттям і без проведено в роботі [10]. Горіння сумішей природного газу з повітрям на поверхні пористих матриць з керамічним покриттям випробовували при варіюванні питомого теплового навантаження. Вимірювали радіаційну температуру поверхні ділянок без і з покриттям, а також відповідні температури на зворотному боці матриці. Видиме світіння поверхні ділянки вихідної матриці без покриття було яскравішим, ніж ділянки з керамічним покриттям. Однак температури поверхні ділянок, виміряні пірометром, виявилися прямо протилежними. Температура поверхні з керамічним покриттям була приблизно на 200 К вище. Таку істотну різницю температур можна пояснити тим, що в ділянці матриці з покриттям внаслідок зменшення коефіцієнта теплопровідності поверхні фронт полум'я проникає глибше в пори матриці, збільшується площа контакту реакційної зони з поверхнею пор. Температура підповерхневого шару матриці підвищується. Радіаційний пірометр реєструє збільшену температуру, оскільки керамічне покриття прозоре в широкому спектрі ІЧ випромінювання. В матрицях з керамічним покриттям зона полум'я переміщується в пори нижче від поверхні матриці, відбувається перерозподіл енергії, що виділяється при згорянні газової суміші. Випромінювана поверхнею енергія зростає. Температура продуктів згорання та енергія, що виноситься продуктами згорання, зменшуються.

В результаті перерозподілу енергії радіаційний коефіцієнт корисної дії пальника при нанесенні кера-

мічного покриття збільшується. Ефективність випромінювання матриці з керамічним покриттям вища до 2 разів у спектральному діапазоні довжини хвиль від 5 до 14 мкм. Зменшується також кількість шкідливих викидів у продуктах згорання (чадного газу – в 2 рази, оксиду азоту – на 10...15 %).

При збіднінні суміші (збільшенні коефіцієнта надлишку повітря) температури поверхневого шару і зворотного боку обох ділянок матриці монотонно падають, що пов'язано зі зменшенням калорійності суміші. Тут також температури матриці з керамічним покриттям вищі у всьому діапазоні зміни параметрів надлишку повітря. Таким чином, на відміну від поверхневого горіння на пористій металевій матриці при нанесенні на її поверхню тонкого шару кераміки відбувається зміна режиму горіння. Фронт полум'я проникає в матрицю на невелику глибину за плівку покриття і температура його значно зростає. Відбувається перерозподіл енергії, отриманої завдяки згорянню горючої суміші. Оскільки температура поверхневого шару матриці стає вищою, це призводить до підсилення радіаційного потоку і одночасно знижується температура продуктів згорання, що повинно вести до зниження швидкості утворення оксидів азоту й монооксиду вуглецю.

На ділянці матриці з керамічним покриттям при високому тепловому навантаженні утворення оксидів азоту знижується в 2 рази. При розбавленні суміші повітрям вміст монооксиду вуглецю й оксидів азоту монотонно падає. Близько до межі поверхневого горіння за щільності потужності 33 Вт/см² концентрація монооксиду вуглецю становить лише ~10 ppm, а концентрація оксидів азоту – близько 3 ppm. Експерименти показали, що завдяки керамічному покриттю підвищилася термічна міцність матриці, розширилися концентраційні межі поверхневого горіння, що дозволяє продовжити термін служби пористих металевих матриць і зменшити матеріалоемність паликових пристроїв.

Висновки

1. Детонаційним методом із використанням БКДП нанесено покриття з оксиду алюмінію на поверхню пористої матриці зі збереженням її поверхневої проникності.

2. Наявність керамічного покриття з меншим коефіцієнтом теплопровідності, ніж у матеріалі матриці, змінює режим горіння горючої газової суміші. Фронт полум'я проникає в матрицю на невелику глибину за шар покриття, що забезпечує покращення технічних характеристик ІЧ пальників.

3. Використання в ІЧ пальниках пористої матриці з керамічним покриттям дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії пальника й зменшити кількість шкідливих викидів у продуктах згоряння (чадного газу – в 2 рази, оксиду азоту – на 10...15 %) і значно підвищити ресурс роботи пальника.

Список літератури/References

1. Srivastava, V.S., Sahoo, K.L. (2006) Metallic Foams: Current Status and Future Prospects. *Materials Science*, **9**, 4, 9–13.
2. Shmelev, V. (2013) Limiting conditions for the combustion of a rich gas mixture on the surface of a permeable matrix. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, **7**, 1, 23–34. <https://doi.org/10.1134/S1990793113010120>
3. Xiao-Hong Han, Qin Wang, Young-Gil Park et al. (2012) A Review of Metal Foam and Metal Matrix Composites for Heat Exchangers and Heat Sinks. *Heat Transfer Engineering*, **33**, **12**, 991–1009. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.659613>
4. Тюрін Ю.М., Колісниченко О.В. (2008) Заявник та патентовласник Ю.М. Тюрін, О.В. Колісниченко. *Спосіб детонаційного напылення покриття і прилад для його здійснення*. Державний реєстр патентів України, Київ, Україна, Пат. 83831.
5. Tyurin, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. (2008) *Method of detonation spraying of coatings and device for its realization*. Pat. 83831, Ukraine [in Ukraine].
5. Колісниченко О.В., Тюрін Ю.М., Товбін Р. (2017) Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства. *Автоматическая сварка*, **10**, 28–34. <https://doi.org/10.15407/as2017.10.03>
6. Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.N., Tovbin, R. (2017) Efficiency of process of coating spraying using multichamber detonation unit. *The Paton Welding J.*, **10**, 28–34. <https://doi.org/10.15407/as2017.10.03>
6. Salimi Jazi, H.R., Mostaghimi, J., Chandra, S. et al. (2009) Spray-Formed, Metal-Foam Heat Exchangers for High Temperature Applications. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, **1**, 3, 031008. <https://doi.org/10.1115/1.4001049>
7. Hafeez, P., Yugeswaran, S., Chandra, S. et al. (2016) Fabrication of High-Temperature Heat Exchangers by Plasma Spraying Exterior Skins on Nickel Foams. *Journal of Thermal Spray Technology*, **25**, **5**, 1056–1067. <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0413-9>
8. Sun, B., Fukunuma, H., Ohno, N. (2009) The Influence of Spray Parameters on the Characteristics of Al_2O_3 Particles and Coatings Sprayed by Detonation Spray. ITSC 2009: proceedings from the 2009 International Thermal Spray Conference, May 4–7, 2009, Las Vegas, Nevada, 830–835.
9. Kovaleva, M., Tyurin, Yu., Vasilik, N. et al. (2013) Deposition and characterization of Al_2O_3 coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator. *Surface & Coatings Technology*, **232**, 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.06.086>
10. Shmelev, V. (2014) Surface Burning on a Foam Metal Matrix with the Ceramic Coating. *Combustion Science and Technology*, **186**, **7**, 943–952. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.890601>

DEPOSITION OF CERAMIC COATING ON THE SURFACE OF A POROUS MATRIX OF INFRARED GAS TORCH

O.V. Kolisnichenko, Yu.M. Tyurin, M.A. Poleshchuk

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

A technology is proposed for deposition of ceramic coating on the surface of Fe-chr porous matrix to improve the performance of infrared torches. Multichamber detonation device allows forming coatings on the working surface without any significant changes of its surface permeability. Presence of Al_2O_3 ceramic coating on the pore walls changes the burning mode. The flame front moves into the matrix to a small depth behind the coating film that leads to reduction of harmful emissions at fuel mixture combustion: carbon monoxide gas to the maximum, nitrogen oxide by 10...15 %. The effectiveness of matrix radiation increases up to 2 times in the spectral infrared range of wave length from 5 to 14 μm . 10 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: porous metal matrices, infrared radiation, detonation spraying, ceramic coatings, harmful emissions, radiation effectiveness

Надійшла до редакції 26.07.2022

НОВА КНИГА



Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. Аргондугове та електронно-променеве зварювання псевдо- β титанового сплаву BT19. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2022. — 128 с.

В монографії розглянуто особливості зварювання псевдо- β титанових сплавів методами аргондугового (АДЗ) та електронно-променевого (ЕПЗ) зварювання. Методами математичного моделювання визначено вплив термічного циклу зварювання на фазовий склад металу зварного шва і зони термічного впливу зварного з'єднання при АДЗ вольфрамовим електродом псевдо- β титанового сплаву BT19. Побудовано діаграму анізотермічних перетворень при охолодженні псевдо- β титанового сплаву та розрахунково-експериментальним методом визначено залежність залишкової кількості β -фази від швидкості охолодження. Розроблено технологію АДЗ із застосуванням присадного дроту або безкисневих флюсів та технологію ЕПЗ з попереднім підгірівом і локальною термічною обробкою. Встановлено залежність міцності з'єднань сплаву BT19, виконаних ЕПЗ, від кількості β -фази в металі шва. Наведено результати досліджень впливу різних видів пічної термічної обробки зварних з'єднань сплаву BT19 на їх структурно-фазовий склад та механічні характеристики. Застосування зазначених технологій зварювання сприятиме більш широкому використанню зварних конструкцій з псевдо- β титанових сплавів в енергетичному та хімічному машинобудуванні, а також в авіакосмічній галузі промисловості. Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також студентів металургійних спеціальностей.

Книгу можна замовити в редакції журналу.

СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПЛАЗМОВІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГРАДІЄНТНИХ ПОКРИТТІВ ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВИМ НАПИЛЕННЯМ

В.М. Пащенко

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

E-mail: vn.paschenko@ukr.net

Досліджений плазмовий пристрій для плазмово-порошкового напилення багатошарових, композиційних та градієнтних покриттів. Проведені експериментальні дослідження енергетичних характеристик дугового генератора плазми з криволінійним дуговим каналом при роботі на плазموутворювальному повітрі з метою доведення принципової можливості його тривалої експлуатації з прийнятними енергетичними і ресурсними характеристиками. Показано, що втрати в елементи конструкції плазмотрона залежать від струму дуги та витрат плазموутворювального газу, характер цієї залежності принципово не відрізняється від звичайних плазмотронів: з підвищенням струму втрати зростають і дещо знижуються при збільшенні витрати газу. Вольт-амперні характеристики генератора плазми спадні, проте наявність перегину дугового каналу як стабілізуючого довжину дуги фактору призводить до появи нейтральної ділянки ВАХ з певною тенденцією до зростання при збільшенні струму. При цьому обмежується діапазон стійкої роботи по струму дуги. Наведений варіант вдосконалення конструкції досліджуваного плазмотрона з розширенням його функціональних можливостей нанесення багатокомпонентних покриттів. Бібліогр. 8, рис. 7.

Ключові слова: плазмово-порошкове напилення, градієнтні покриття, багатошарові покриття, дуговий генератор плазми з криволінійним каналом, плазмоутворювальне повітря, вольт-амперні характеристики, коефіцієнт корисної дії, спеціалізований плазмовий пристрій

Вступ. Значна кількість деталей із покриттями металургійного, хімічного, авіаційного та іншого обладнання працюють за умов високих навантажень та різких коливань температури навколишнього середовища. При цьому штучно створені функціональні поверхневі шари виробів повинні зберігати свої властивості протягом всього терміну експлуатації. Хімічний склад і структура покриттів, а, відповідно, і фізико-механічні властивості матеріалу, з якого вони створені, можуть різко відрізнятися від властивостей матеріалу основи (наприклад, керамічні покриття на металевих основах). Часто виникає проблема порушення механічної цілісності системи «покриття-основа» через різку відміну коефіцієнтів термічного розширення матеріалів (КТР) основи і покриття. Достатньо широко використовуються також композиційні покриття різного функціонального призначення з металевими та керамічними складовими. Причому формування таких покриттів відбувається з компонентів, що окремо подаються в зону формування композиційного покриття.

Найбільш розповсюдженими методами створення поверхневих шарів такого типу на сьогодні є газотермічне порошкове напилення (зокрема, плазмове) та плазмово-порошкове наплавлення [1, 2].

Не втратила на сьогодні своєї актуальності також ідея створення «адіабатного» двигуна внутрішнього згоряння [3]. Створення керамічного дизеля з теплоізолюваною камерою згоряння (зв-

ного адіабатним) дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії двигуна у 1,5 рази та досягти питомої (на одиницю потужності) маси майже на 30 % менше ніж у традиційної конструкції. Такі двигуни можуть працювати на паливах широкофракційного і погіршеного складу, тобто є багатопаливними, оскільки висока температура стінок камери згоряння сприяє займанню важкозаймистих палив. У ході створення адіабатного двигуна поряд із застосуванням монолітних деталей із кераміки передбачається застосування металевих деталей з теплобар'єрними керамічними покриттями.

Найбільш часто в якості матеріалу теплобар'єрних покриттів (ТБП) використовуються оксиди цирконію та алюмінію, що обумовлено, в першу чергу, їх низькою теплопровідністю [4]. Робоча температура покриття із оксиду цирконію, стабілізованого Y_2O_3 , становить близько 1090 °С. Перспективними вважаються ТБП нового покоління на основі фосфату лантану та гексоалюмінату лантану. Ці матеріали можуть експлуатуватися при температурах 1100...1600 °С.

Теплобар'єрні покриття зазвичай складаються з двох шарів, що виконують різні функції. Верхній шар (керамічний) сприймає тепловий та ерозійний вплив газового потоку і, маючи низьку теплопровідність, знижує температуру деталі, яка захищається. Під керамічним шаром знаходиться жаростійкий шар, що захищає основу від окиснення і сприяє підвищенню міцності зчеплення кераміч-

ного шару з металом основи. Додаткове зниження теплопровідності керамічних покриттів може бути досягнуто їх багат шаровим нанесенням.

Застосування проміжного шару із металевого матеріалу частково вирішує проблему узгодження КТР матеріалів основи і функціонального покриття, але повне вирішення можливе лише у випадку поступового переходу від КТР матеріалу основи до КТР матеріалу верхнього шару покриття. Перехід може бути реалізований ступінчасто, збільшенням кількості перехідних шарів зі змінним значенням КТР [4, 5], або у вигляді покриття із плавною зміною фізичних властивостей матеріалу покриття у напрямку від основи до поверхні виробу. Такі покриття позиціонуються як градієнтні.

Створення градієнтного покриття можливе шляхом застосування вже готових сумішей основного функціонального покриття (керамічного) та матеріалу підшару [4, 5]. Такі готові суміші мають змінну пропорцію між компонентами. Спочатку наноситься шар покриття, що складається тільки із металевої компоненти, а потім наступні шари із готових сумішей, в яких вміст керамічної складової поступово збільшується. Самий верхній функціональний шар покриття містить тільки керамічну складову. Такий спосіб гарантує необхідне співвідношення між компонентами у кожному шарі, але потребує наявності кількох дозаторів-живильників (за кількістю шарів), що вмикаються послідовно, або перезавантаження порошком із новим співвідношенням компонентів одного дозатора (з обов'язковим очищенням від попереднього порошку).

Більш перспективним шляхом може бути використання комплексу обладнання, що містить таку кількість дозаторів, яка дорівнює кількості компонентів композиції у майбутньому покритті (у простішому випадку два) [6].

Робота таких дозаторів-живильників відбувається одночасно за певним алгоритмом, який визначає продуктивність роботи кожного. Керування (зміна співвідношення між компонентами у газопорошковому потоці) може здійснюватися у функції часу, якщо можливе точне визначення товщини шару, який наноситься, за продуктивністю дозатора та коефіцієнта використання матеріалу, або у функції кількості проходів, якщо відома товщина покриття, що отримується за один прохід. Керування можливе також у разі застосування апаратних засобів оперативного визначення товщини шару покриття, який формується. Реалізація алгоритму потребує наявності мікропроцесорного блоку керування, який має зворотний зв'язок із ходом процесу формування покриття.

Ще однією проблемою у ході реалізації технології нанесення градієнтних покриттів є організація процесу нагрівання вихідного матеріалу, який містить компоненти з різко відмінними фізичними властивостями. Враховуючи суттєву просторо-

ву неоднорідність температурних, концентраційних та швидкісних полів високотемпературного газового потоку, практично неможливо визначити одне місце введення компонентів вихідного матеріалу, яке б забезпечувало оптимальні умови нагрівання та прискорення як металевої, так і керамічної складової (не кажучи вже про захист матеріалу від небажаного впливу активних газів навколишнього середовища). Керамічна складова вихідного матеріалу потребує високої температури і порівняно тривалого часу перебування в активній зоні плазмового струменя. Металева – захисту від окиснення та обмеження процесу інтенсивного випаровування шляхом мінімізації часу перебування в зоні надвисоких температур.

Враховуючи, що найбільш поширеним способом введення вихідного матеріалу у плазмовий струмінь є введення його за межами конструкції генератора плазми, широких можливостей оптимізації умов нагрівання та прискорення порошку сучасні конструкції розпилювачів не надають. Введення вихідного матеріалу (для керамічної складової) під кутом безпосередньо у дуговий канал суттєво знижує надійність процесу через високу ймовірність налипання матеріалу на стінки дугового каналу і виникнення нештатних аварійних режимів роботи плазмотрона. До того ж, надійність конструкції зменшується через необхідність проходження порошкопроводом водяних сорочок охолодження теплонапружених елементів конструкції генератора плазми [6].

Співвісне з потоком плазми подавання вихідного матеріалу не представляється можливим через наявність центрального водоохолоджуваного електрода в дугових генераторах лінійної схеми [7].

Мета даної роботи полягає в тому, щоб на основі результатів експериментальних досліджень горіння дуги в криволінійних дугових каналах довести принципову можливість створення нового покоління плазмових пристроїв для нанесення покриттів складної конструкції – багат шарових та градієнтних із матеріалів з суттєво відмінними фізико-механічними властивостями.

Методика експериментів. Дослідження проводились на двоелектродному плазмотроні з дуговим каналом, який складається із кількох ділянок, що розміщені під кутом одна до одної. Просторова стабілізація дуги – вихрова.

В якості плазмоутворювальної речовини використовувалося повітря та суміш повітря з пропан-бутаном. Газова суміш готувалася попередньо і подавалася у генератор плазми вже з відомим співвідношенням компонентів.

Електричні параметри пристрою (напруга на дузі та струм дуги) вимірювались електронними та стрілочними приладами.

Втрати в елементи конструкції генератора плазми визначались шляхом вимірювання витрати охолоджувальної рідини та її температури на

вході та виході контурів охолодження відповідних вузлів. Температура вимірювалась за допомогою ртутних лабораторних термометрів з ціною поділки 0,1 °С.

Результати досліджень та їх обговорення. Відомі прямі способи відхилення потоку від осі дугового каналу шляхом застосування кутових сопел [7] дозволяють відхиляти струмінь на визначений кут за рахунок зміни напрямку витікання вже сформованого струменя. Такий спосіб має суттєвий недолік – відхилення плазмового потоку на стадії розвинутої турбулентної течії викликає різке зростання теплових втрат у стінку сопла у місці повороту струменя плазми, що погіршує енергетичні параметри плазмотрона і значно скорочує ресурс роботи вихідного електрода.

Цього недоліку можна позбутись, якщо плазмовий потік повернути ще на етапі його формування. Для цього дуговий канал виконують з двох частин, що стикаються між собою під деяким кутом. За цих умов більша частина основної ділянки дуги розміщена на вхідній, а менша частина основної ділянки дуги та її приелектродна ділянка на вихідній ділянці дугового каналу, під кутом до початкової та основної ділянок дуги [8].

Така організація горіння дуги дає змогу деякою мірою захистити стінки дугового каналу у місці зміни напрямку руху газового потоку від тепла нагрітої частини газу за допомогою збереженого на цьому етапі формування потоку плазми холодного прошарку газу між стінкою каналу та електричною дугою і не повністю сформованим плазмовим потоком.

На рис. 1 показаний варіант пристрою для реалізації описаного способу.

Вихідний електрод пристрою, у якому розміщується дуговий канал, складається з двох конструктивних одиниць, нерухомо з'єднаних між собою. Кожна характерна ділянка дугового каналу розміщена в межах своєї конструктивної одиниці і має

індивідуальну незалежну систему охолодження. Вхідній ділянці дугового каналу характерний порівняно невисокий рівень теплових втрат [7], тому вузол, в якому вона розміщена, може мати повітряне охолодження (природне або примусове). У межах цього ж вузла розміщений кутовий перехід вхідної ділянки дугового каналу до початкової ділянки вихідного дугового каналу та проходить порошкопровід.

Кінцева ділянка вихідного дугового каналу має, зазвичай, водяне охолодження. Для раціонального використання об'єму матеріалу і підвищення загального ресурсу вихідного електрода у вихідній частині вихідного електрода зроблений цілий ряд каналів, кожний з яких, за певних умов, може слугувати кінцевою ділянкою вихідного дугового каналу. За конкретних умов тільки один з каналів, у якого вхідний отвір співпадає з вихідним отвором початкової ділянки вихідного дугового каналу, слугує кінцевою ділянкою вихідного дугового каналу. Всі інші канали є резервними і послідовно задіюються до роботи при зміні положення вихідної частини вихідного електрода відносно його вхідної частини.

Експериментальні дослідження макету плазмового розпилювача, створеного за запропонованою схемою, показали технічну життєздатність конструкції у випадку роботи на типових для плазмового наплення струмових навантаженнях і використанні плазмоутворювальних сумішей системи N–O або N–O–C–H. Дослідження енергетичних характеристик проводилося на діючому макеті розпилювача (рис. 2).

Для живлення плазмотрона було застосовано тиристорне джерело струму типу АПР-402, яке стабілізує струм дуги у діапазоні 100...450 А при зміні робочої напруги від 100 до 250 В.

Катодний вузол і вихідна частина дугового каналу в межах анода мали пряме водяне охоло-

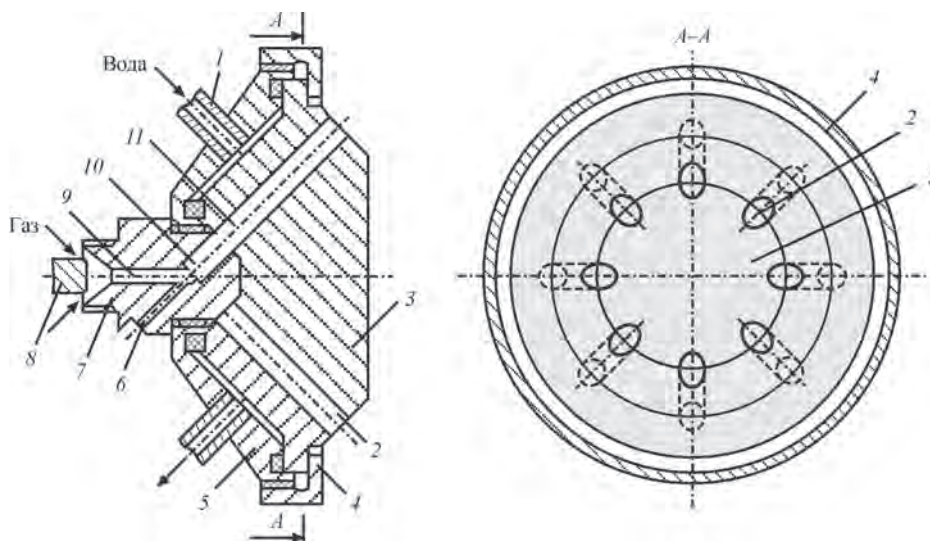


Рис. 1. Плазмотрон зі збірним дуговим каналом: 1 – штуцер; 2 – ділянки дугового каналу; 3 – вихідна частина аноду; 4 – накидна гайка; 5 – корпусна деталь; 6 – канал подавання порошку; 7 – вхідна частина аноду; 8 – катод; 9 – вхідна частина дугового каналу; 10 – початкова ділянка вихідної частини дугового каналу; 11 – кінцева ділянка вихідної частини дугового каналу

дження, а вхідна частина дугового каналу – природне повітряне охолодження.

Змінними режимними параметрами роботи плазмотрона були витрата плазмоутворювального повітря (тиск газу перед розпилювачем) та струм дуги.

Основні результати експериментальних досліджень наведені на рис. 3–5.

Значення напруги на дузі визначається струмом дуги і витратою (тиском) плазмоутворювального газу. Зі збільшенням витрати газу дуга подовжується і, відповідно, підвищується інтегральне значення падіння напруги на ній. Зі збільшенням струму дуга скорочується і падіння напруги стає меншим (рис. 3).

Характерною особливістю досліджуваного плазмотрона є наявність на струмі вище 170...180 А нейтральної ділянки статичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) з тенденцією переходу її до зростаючої у разі збільшення струму дуги вище 220...230 А.

Вочевидь це є наслідком фіксації довжини дуги на повороті дугового каналу в деякому діапазоні зміни струму та витрати плазмоутворювального газу. Початок процесу стабілізації довжини дуги залежить від витрати плазмоутворювального газу – чим менша витрата, тим нижче порогове значення струму, при якому починається стабілізація довжини дуги.

Збільшення струму до рівня 270...300 А призводить до переходу у нештатний режим роботи генератора плазми, який характеризується стрибкоподібним скороченням дуги з втягуванням її у вузьку частину дугового каналу. Цьому режиму роботи плазмотрона характерні підвищені втрати енергії на початковій ділянці дугового каналу. А враховуючи, що ця ділянка має у конкретному випадку природне повітряне охолодження, це при-



Рис. 2. Плазмотрон з криволінійним дуговим каналом

зведе до перегрівання матеріалу електрода та різкому прискоренню процесу його ерозії.

На рис. 4 наведено залежності втрат в анодний вузол плазмотрона від режимних параметрів роботи пристрою.

Втрати енергії у вхідну частину дугового каналу (ділянку з меншим діаметром) при штатних режимах роботи визначаються практично втратами тепла через випромінювання дуги, тому зменшуються зі зниженням струму і підвищенням витрати плазмоутворювального газу внаслідок зниження середньомасової температури плазми.

Втрати у вихідну частину дугового каналу визначаються, в основному, струмом дуги. Одночасно з підвищенням витрати плазмоутворювального газу, внаслідок потовщення прошарку холодного газу між дугою і стінкою дугового каналу та скорочення ділянки розвиненої турбулентної течії високотемпературного потоку газу в межах дугового

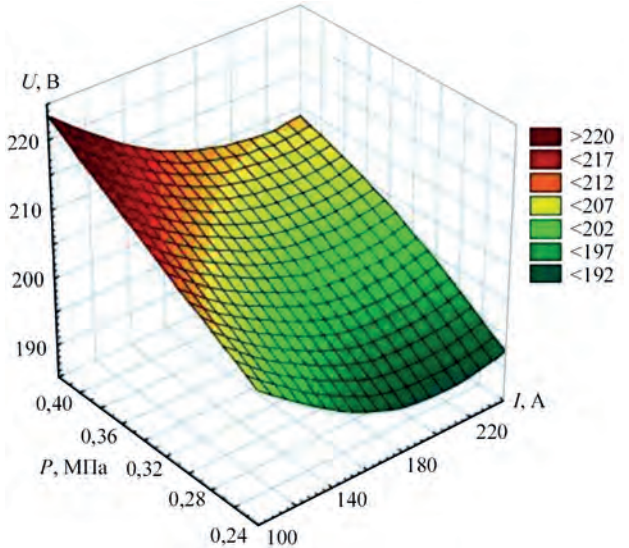


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики плазмового розпилювача

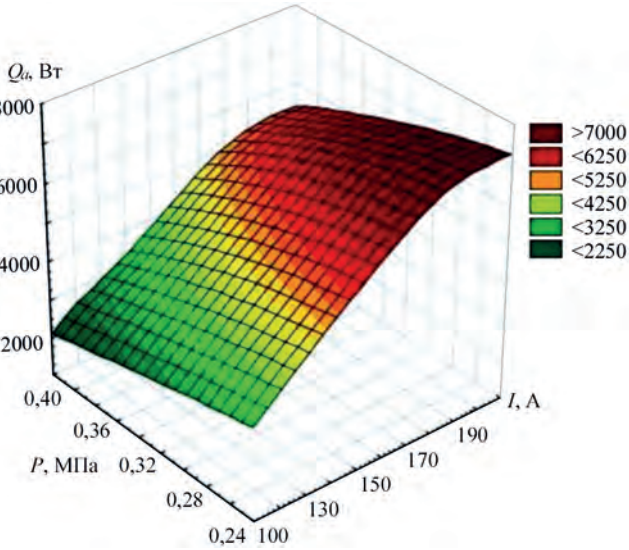


Рис. 4. Залежність втрат енергії в анодний вузол генератора плазми від струму дуги та тиску плазмоутворювального газу

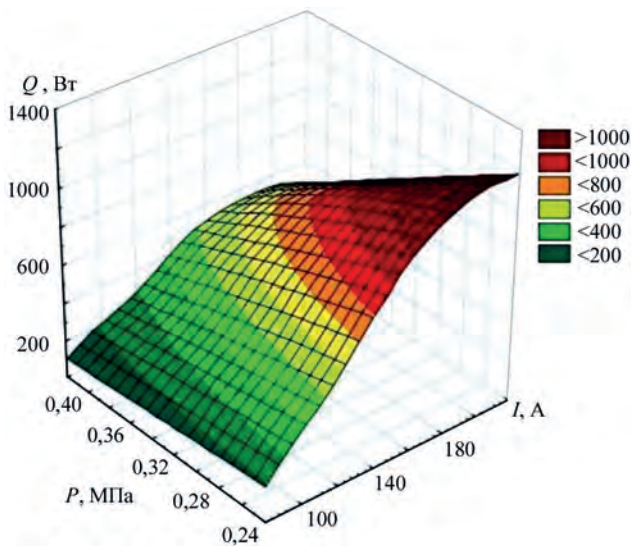


Рис. 5. Залежність втрат енергії в катодний вузол генератора плазми від струму дуги та тиску плазмоутворювального газу каналу, загальний рівень втрат у вихідний електрод дещо зменшується.

Втрати у катодний вузол зростають у міру зростання струму дуги за умови постійної витрати плазмоутворювального газу, і дещо зменшуються у разі підвищення його витрати (рис. 5). Збільшення витрати холодного плазмоутворювального газу інтенсифікує процес відведення тепла від елементів конструкції катодного вузла через інтенсивний обдув зовнішньої поверхні термохімічного катода та вузла його кріплення. За цих умов має місце рекуперація частини енергії електричної дуги, яка не втрачається, а використовується на попереднє підігрівання плазмоутворювального газу.

Тепловий коефіцієнт корисної дії плазмотрона (ККД), що розрахований за вимірними втратами енергії, в конкретному випадку має досить високі значення у всьому діапазоні зміни струму дуги. Хоча слід мати на увазі, що наявність у вихідному електроді ділянки з природнім повітряним охолодженням, втрати в яку не враховуються у розрахунках, дає дещо завищені значення розрахованого ККД (рис. 6).

Зі збільшенням струму дуги спостерігається зниження значення ККД, але, починаючи із значень струму 160...170 А, наявне уповільнення темпу падіння ККД та стабілізація його на рівні 0,76...0,8. Слід зазначити, що високі значення ККД 0,8...0,86 характерні для роботи плазмового генератора з підвищеною витратою плазмоутворювального газу. Такі режими роботи, зазвичай, не характерні процесам нанесення покриттів через низькі значення питомої енергії потоку високотемпературного газу.

У випадку використання плазмотрона як розпилювача дисперсного матеріалу із введенням порошку разом із транспортуючим газом співвідносно з вихідною ділянкою дугового каналу, слід очікувати зміну умов горіння електричної дуги та харак-

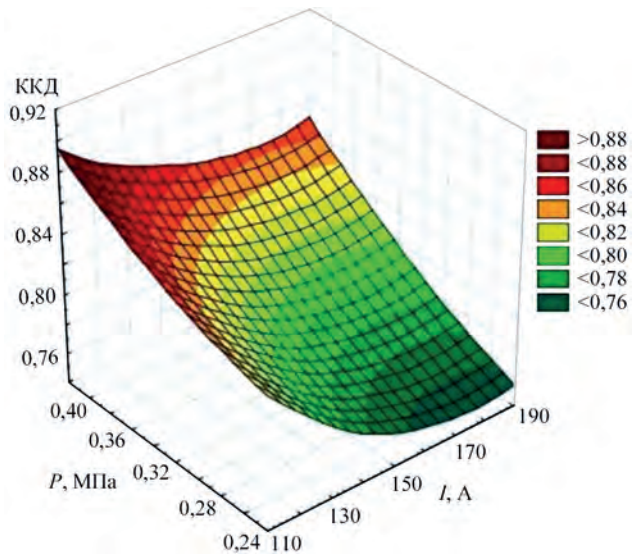


Рис. 6. Залежність ККД плазмотрона від струму дуги при різних значеннях тиску плазмоутворювального газу

теру теплообміну з робочими газами. Транспортуючий газ приймає активну участь у формуванні потоку плазми, бо подається в зону електричної дуги. Місцезоположення плями прив'язування дуги у цьому випадку буде частково залежати також від витрати і складу транспортуючого газу. А форма і характер плями прив'язування дуги будуть певним чином залежати від складу транспортуючого газу з потенційною можливістю за певних умов переходу до дифузного прив'язування дуги.

Наявність у плазмотроні ділянки дугового каналу з повітряним охолодженням дає можливість прокладання порошкопроводу через анодний вузол без пересікання його сорочок охолодження (див. рис. 1). Однак практично реальними залишаються тільки два варіанти подавання компонентів композиційного матеріалу: у місці перегину дугового каналу (за умови застосування повітряного охолодження) та за межами дугового каналу на зрізі сопла розпилювача. Всі інші потребують пересікання сорочок охолодження електродів і відповідного ускладнення конструкції із втратою надійності пристрою. Це певним чином обмежує можливості оптимізації технології шляхом зміни місця введення у високотемпературний газовий потік окремих компонент вихідного матеріалу з метою врахування їх фізичних та геометричних характеристик.

Подальше вдосконалення конструкції досліджуваного генератора плазми значною мірою вирішує згадану проблему і дозволяє створити спеціалізований плазмовий пристрій з широкими функціональними можливостями для нанесення багатошарових та градієнтних покриттів (рис. 7). Для цього у вихідному електроді (аноді) створюється конусоподібна порожнина, на поверхні якої розташовані входи каналів для подавання дисперсного матеріалу. Канали сполучаються з відповідними кінцевими ділянками дугового каналу, при-

чому розташування кожного каналу і місце його сполучання з дуговим каналом визначається важкістю плавлення матеріалу, що використовується, і може бути різним для наявних кінцевих ділянок вихідного дугового каналу (у конкретному випадку таких ділянок 8).

Показаний на рисунку пристрій для нанесення багатошарового композиційного покриття складається з трьох конструктивних одиниць, нерухомо з'єднаних між собою. Кожна характерна ділянка дугового каналу розміщена в межах своєї конструктивної одиниці і має індивідуальну незалежну систему охолодження. Вхідній ділянці дугового каналу характерний невисокий рівень теплових втрат, тому вузол, в якому вона розміщена, може мати (за певних умов) повітряне охолодження (природне або примусове). У межах цього ж вузла розміщений кутовий перехід вхідної ділянки дугового каналу до початкової ділянки вихідного дугового каналу та проходить порошкопровід. Кінцева ділянка вихідного дугового каналу має, зазвичай, водяне охолодження і розміщується під кутом до поздовжньої осі вихідної частини вихідного електрода. Для раціонального використання об'єму матеріалу і для підвищення загального ресурсу вихідного електрода у вихідній частині вихідного електрода зроблений цілий ряд каналів, кожний з яких, за певних умов, може слугувати кінцевою ділянкою вихідного дугового каналу. У конкретному випадку тільки один із каналів, у якого вхідний отвір співпадає з вихідним отвором початкової ділянки вихідного дугового каналу, слугує кінцевою ділянкою вихідного дугового каналу. Всі інші канали є резервними і послідовно задіюються до роботи при зміні положення вихідної частини вихідного електрода відносно його вхідної частини вихідного електрода. Можлива кількість каналів визначається конструктивно, з урахуванням обов'язкової наявності стінки

певної товщини між сусідніми каналами, необхідної для ефективного відведення тепла вглиб вихідного електрода. В торці вихідного електрода зроблена конусоподібна порожнина, на поверхні якої розміщені отвори. Отвори сполучаються з вихідними ділянками дугового каналу. Місце входу отворів у вихідні ділянки дугового каналу визначається з урахуванням температури плавлення конкретної компоненти композиційного матеріалу, з якого формується покриття. Тугоплавка компонента композиційного матеріалу може вводиться у районі переходу вхідної ділянки дугового каналу у початкову ділянку вихідного дугового каналу. Напрямок початкового руху частинок порошку і плазмового потоку співпадають, тому тугоплавка компонента не буде мати радіальної складової швидкості (відносно поздовжньої осі дугового каналу) і буде перебувати у високотемпературній зоні максимально можливого часу. Всі інші компоненти матеріалу покриття можуть вводиться через отвори, які розміщуються на різній відстані від зрізу сопла плазмового пристрою. Вибір каналу, який буде робочим, із всієї сукупності каналів, здійснюється виходячи із температури плавлення та розмірів другої компоненти композиційного матеріалу. Ці критерії визначають місцеположення сполучання порошкопроводу з дуговим каналом плазмового пристрою і, відповідно, вибір тієї чи іншої резервної ділянки.

Розміщення каналів для подавання порошку на поверхні внутрішньої центральної конусної порожнини не потребує перетинання сорочки охолодження вихідного електрода, бо водяне охолодження електрода відбувається тільки збоку його зовнішньої поверхні.

У разі переходу на напilenня іншої композиції матеріалів можлива заміна каналу на один із резервних, який більш придатний для подавання нових компонент композиційного матеріалу. У ви-

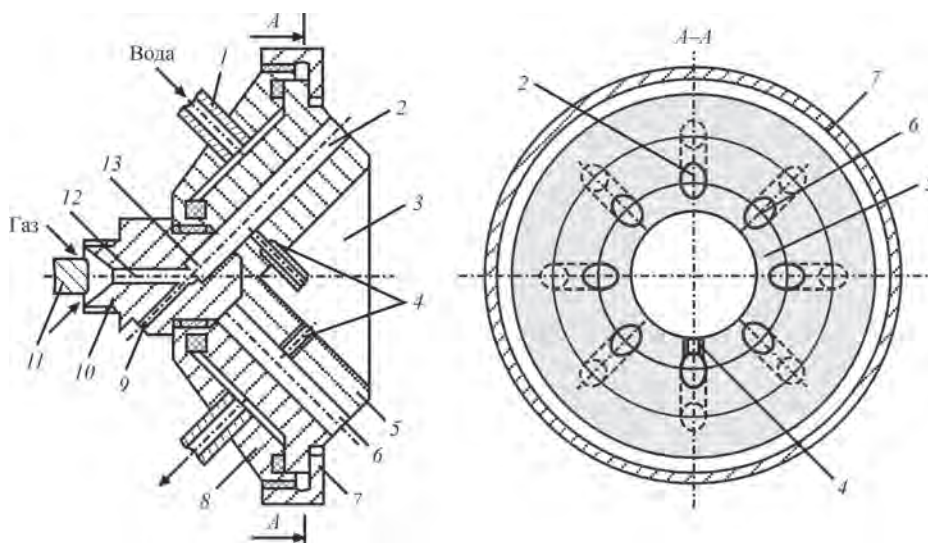


Рис. 7. Конструкція генератора плазми для нанесення багатокомпонентних покриттів: 1 – штуцер; 2 – кінцева ділянка вихідної частини дугового каналу; 3 – порожнина; 4, 9 – канали подавання порошку; 5 – вихідна частина аноду; 6 – ділянки дугового каналу; 7 – накидна гайка; 8 – корпусна деталь; 10 – вхідна частина аноду; 11 – катод; 12 – вхідна частина дугового каналу; 13 – початкова ділянка вихідної частини дугового каналу

падку тривалого напilenня однієї композиції, резервні канали роблять ідентичними з точки зору місця розміщення порошкопроводу. У цьому випадку наявність резервних каналів дозволяє стабілізувати якість покриття і підвищити загальний ресурс пристрою. Для запобігання погіршення якості покриття та ефективності процесу напilenня при зміні геометричних розмірів і конфігурації дугового каналу внаслідок ерозії матеріалу електрода, вихідні ділянки дугового каналу періодично замінюють.

Висновки

1. Застосування генераторів плазми з криволінійним дуговим каналом доцільне у випадку створення багатошарових композиційних покриттів із компонентами, що різко відрізняються за своїми фізико-механічними характеристиками.

2. Складна конфігурація дугового каналу дещо обмежує діапазон стійкої роботи генератора плазми по струму дуги і витраті плазмоутворювальної газової суміші.

3. Загальний характер залежностей енергетичних характеристик плазмотрона з криволінійним дуговим каналом від основних режимних параметрів ідентичний аналогічним залежностям для традиційних генераторів плазми із прямолінійним дуговим каналом.

4. Вплив режимів експлуатації генераторів плазми з криволінійним дуговим каналом на їх ресурсні характеристики потребує подальших досліджень з метою встановлення раціональних режимів експлуатації.

Список літератури

1. Сом А.И., Галагуз Б.А. (2020) Плазменно-порошковая наплавка композиционных сплавов с раздельной подачей карбидов вольфрама и матричного сплава. *Автоматическая сварка*, **12**, 37–43.
2. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Грищенко А.П. и др. (2019) Структура и фазовый состав плазменных покрытий ZrB₂-SiC-AlN на поверхности композиционного материала C/C-SiC. *Там же*, **5**, 25–35.

3. Мацкерле Ю. (1987) *Современный экономичный автомобиль*. Пер. с чешск. В.Б. Иванова; Бенедиктов А.Р. (ред.). Москва, Машиностроение.
4. Борисова А.Л., Борисов Ю.С., Астахов Е.А. и др. (2012) Теплозащитные свойства газотермических покрытий, содержащих квазикристаллический сплав системы Al-Cu-Fe. *Автоматическая сварка*, **4**, 38–41.
5. Мацука Н.П., Громыка Г.Ф., Шевцов А.И., Ильющенко А.Ф. (2019) *Моделирование нестационарных тепловых процессов при формировании градиентных газотермических покрытий на основе самофлюсующегося сплава, модифицированного твердыми тугоплавкими соединениями под импульсным высокоэнергетическим воздействием*. Минск, Еругинские чтения-2019, сс. 88–89.
6. Зайцев О.В. (2008) *Розробка матеріалів для захисту деталей авіаційних двигунів від високотемпературної ерозії*: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.02.01. Дніпропетровськ.
7. Пашченко В.М. (2018) *Дугові генератори в технологіях інженерії поверхні*. Харків, Мачулін.
8. *Пристрій для формування газопорошкового потоку при плазмовому напilenні*. Україна пат. 42589 МПК (2009) B05B 7/00, H05H 1/00. № 200901606; заяв. 24.02.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13.

References

1. Som, A.I., Galaguz, B.A. (2020) Plasma transferred arc surfacing of composite alloys with separate feed of tungsten carbides and matrix alloy. *The Paton Welding J.*, **12**, 34-39.
2. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Grishchenko, A.P. et al. (2019) Structure and phase composition of ZrB₂-SiC-AlN plasma coatings on the surface of C/C-SiC. *The Paton Welding J.*, **5**, 18-27.
3. Matskerle, Yu. (1987) *Modern economy car*. Ed. by A.R. Benediktov. Moscow, Mashinostroyeniye [in Russian].
4. Borisova, A.L., Borisov, Yu.S., Astakhov, E.A. et al. (2012) Heat-protecting properties of thermal spray coatings containing quasi-crystalline alloy of the Al-Cu-Fe system. *The Paton Welding J.*, **4**, 31-36.
5. Matsuka, N.P., Gromyka, G.F., Shevtsov, A.I., Iliyushchenko, A.F. (2019) *Modeling of nonstationary thermal processes in formation of gradient thermal coatings based on self-fluxing alloy modified with solid refractory compounds under pulsed high-energy action*. Minsk, Erugiskie Chteniya-2019, 88–89 [in Russian].
6. Zajtsev, O.V. (2008) Development of materials for protection of aircraft engine parts from high-temperature erosion. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree, Dnipropetrovsk* [in Ukrainian].
7. Pashchenko, V.M. (2018) *Arc generators in surface engineering technologies*. Kharkiv, Machulin [in Ukrainian].
8. (2009) *Device for formation of gas-powder flow in plasma spraying*. Pat. Ukraine 42589. Int. Cl. B05B 7/00, H05H 1/00 No. 200901606; fill. 24.02.2009; publ. 10.07.2009 [in Ukrainian].

SPECIALIZED PLASMA DEVICES FOR PRODUCING GRADIENT COATINGS BY PLASMA POWDER SPRAYING

V.M. Pashchenko

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohi Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: vn.paschenko@ukr.net

A plasma device for plasma-powder spraying of multilayer, composite and gradient coatings was studied. Experimental studies of energy characteristics of plasma arc generator with curvilinear arc channel were performed at operation in plasma-generating air with the purpose of proving the principal possibility of its long-term service with acceptable energy and life characteristics. It is shown that losses into the plasmatron structure elements depend on arc current and plasma gas flow rate, and the nature of this dependence does not differ in principle from regular plasmatrons: the losses increase with current rise and somewhat decrease at increase of gas flow rate. Volt-ampere characteristics of plasma generator are drooping. However, the presence of arc channel bend as a factor stabilizing the arc length, leads to appearance of a neutral region of VAC with a certain tendency to increase at current rise. Here, the stable operation range is limited by arc current. A variant of improvement of the studied plasmatron design with widening of its functional possibilities of multicomponent coating deposition is given. 8 Ref., 7 Fig.

Key words: plasma-powder spraying, gradient coatings, multilayer coatings, plasma generator with a curvilinear channel, plasma-generating air, volt-ampere characteristics, efficiency, specialized plasma device

Надійшла до редакції 31.08.2022

75-та АСАМБЛЕЯ МІЖНАРОДНОГО ІНСТИТУТУ ЗВАРЮВАННЯ

Після двох років вимушеного, через пандемію COVID-19, проведення заходів в онлайн форматі 75-та щорічна асамблея Міжнародного інституту зварювання та міжнародна конференція пройшли практично за звичайних умов в Токіо (Японія) з 17 по 22 липня 2022 р. Більше 600 учасників приїхали до столиці Японії, а більше 250 приєдналися до заходів онлайн. Учасники представляли 43 країни світу. Приймали учасників Спілка зварювальників Японії та Інститут зварювання Японії.

Українська делегація на щорічній асамблеї та міжнародній конференції була представлена делегацією з 10 науковців, яку очолював представник України в МІЗ – учений секретар Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, к.т.н. Ілля Клочков. Варто зазначити, що вісім членів делегації – молоді перспективні науковці Інституту, а саме Євген Ілляшенко, Олексій Міленін, Святослав Мотрунич, Віталій Порохонько, Дмитро Строгонов, Максим Хохлов, Сергій Шваб і Олексій Шуткевич. Крім них, у складі української делегації була к.т.н. Євгенія Чвертко, яка входить до керівних органів МІЗ.

67 сесійних засідань в різних робочих групах було проведено за час роботи. На них було представлено 170 наукових доповідей, стандартів, а також представлені позитивні результати досліджень, участі в наукових проектах, обміну досвідом в межах програм мобільності тощо.

Свої доповіді представили й українські науковці. А доповіді Євгена Ілляшенка («Осо-

бливості формування тонколистових з'єднань при лазерно-плазмовому зварюванні сталей та алюмінієвих сплавів – Features of formation of thin-sheet joints during laser-plasma welding of steels and aluminum alloys»), Олексія Міленіна («Новий підхід чисельної оцінки граничного стану та надійності кородованих трубопроводів при ремонтному зварюванні без виведення з експлуатації – Novel approach for numerical evaluation of limiting state and reliability of corroded pipelines under in-service repair welding»), Святослава Мотрунича («Опір втомі тонколистових зварних з'єднань різномісцевих алюмінієвих сплавів 2024 та 5056, виконаних зварюванням тертям з перемішуванням – Fatigue life of thin sheet joints of dissimilar AA2024 and AA5056 produced by friction stir welding technology»), Віталія Порохонька («Електрошлакове зварювання ультратовстих плит титанового сплаву ВТ6 – Electroslog welding of ultra-thick plates of Ti-6–4 titanium alloy») та Максима Хохлова («Дифузійне зварювання магнієвих сплавів з використанням прошарків на основі галію – Diffusion bonding of magnesium alloys using gallium-based interlayers») на засіданнях відповідних робочих груп МІЗ рекомендовані до публікації в журналі «Welding in the World».

Вже стало доброю традицією, що в програмі заходів окремо приділяється увага молодим науковцям. В Токіо сесійне засідання молодих



вчених мало дуже красномовну назву «Young Professionals Ice Breaking Session – «Криголама-на» сесія молодих професіоналів».

Як це робиться кожного року, МІЗ вручив призи та нагороди за видатні внески в розвиток зварювання, з'єднання та споріднених процесів, а також за підтримку діяльності Міжнародного інституту зварювання. Так, лауреатами стали:

- знак члена МІЗ – проф. Дорин Дехелин, пані Тереза Мелфі, проф. Джон Ліпполд, д-р Женг Сун;
- нагорода Артура Сміта – д-р. Уоррен Міліетті;
- приз Андре Леруа – д-р Нік Петерсон;
- нагорода Кріса Смалбоуна – пан Ден Тадіч;
- медаль Томаса – пан Брюс Кеннон;
- приз Гуеррера – д-р Жанг Джінуен;
- нагорода Халіла Кая Гедіка – пан Томоюке Уеяма;
- нагорода Хенрі Гренджона (категорія А) – д-р Жун Сяо;
- нагорода Хенрі Гренджона (категорія В) – д-р Анна Регенсбург;
- нагорода Хенрі Гренджона (категорія С) – д-р Мітчел Гремз;
- нагорода за Ходремон лекцію та лектору – д-р – інж. Ейсаку Іто;
- нагорода за кращу статтю в журналі «Welding in the World» за 2021 рік – Пікснер, Р. Бузолін, С. Шьонфелдер, Д. Тоерманн, Ф. Варкомська, Н. Енцигер; А. Валіете Бернехо, К.Т. Пандян, Б. Аксельссон, Е. Хараті, А. Кісілевич, Л. Карлссон;



Сорін Келлер

Дж. Менетті, А. Кампаноло, С. Массаджа.

Церемонії нагородження, засіданням робочих груп і виступам на них із доповідями передувало офіційне відкриття заходу та доповідь виконуючого обов'язки президента МІЗ Соріна Келлера на 75-й щорічній асамблеї, що була затверджена учасниками асамблеї. Він, також, привітав нових членів МІЗ від Ірану, Мексики та Гани.

Пан Сорін Келлер повідомив, що Рада директорів МІЗ ухвалила рішення про відкриття Благодійного фонду зварювання при МІЗ для підтримки сфери діяльності цієї міжнародної організації.

На щорічній асамблеї виконуючий обов'язки президента представив пропозицію Ради директорів обрати президентом МІЗ д-ра Томаса Бьоллінгхауза, що була підтримана асамблеєю.



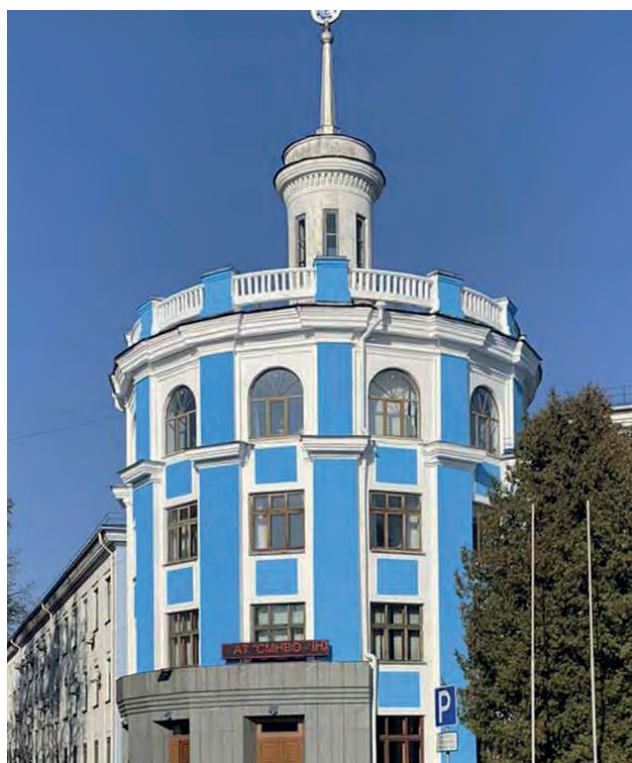
Томас Бьоллінгхауз

75-та щорічна асамблея затвердила дати та місця проведення наступних асамблей та міжнародних конференцій МІЗ:

- 16–23 липня 2023 р. – Сінгапур;
- 6–12 липня 2024 р. – Родос (Греція);
- 22–27 червня 2025 р. – Генуя (Італія).

Прес-група ІЕЗ

СПІВПРАЦЯ ІЕЗ ТА «СМНВО-ІНЖИНІРИНГ»



У жовтні цього року директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України академік І.В. Кривцун з колегами відвідали акціонерне товариство «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – Інжиніринг». У рамках візиту вони провели нараду з генеральним директором підприємства В.М. Лук'яненком, ознайомились з діяльністю «СМНВО-Інжиніринг» та визначили перспективні напрямки співробітництва відповідно до нових викликів часу і потреб промисловості України. За результатами зустрічі була підписана генеральна угода про науково-технічне довгострокове співробітництво в галузі енергетичного, нафтохімічного та атомного машинобудування, зварювання, металургії й розробки нових матеріалів, в т.ч. електродів для зварювання. В рамках угоди передбачається також спільна участь ІЕЗ та «СМНВО-Інжиніринг» в національних та міжнародних промислових виставках та співробітництво по актуалізації контенту журналів «Автоматичне зварювання» і «The Paton Welding Journal» відповідно до вимог часу.

Прес-група ІЕЗ

ПЕРЕДПЛАТА 2023

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.	280	840	1680	3360
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	280	560	1120
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	280	560	1120
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	560	1680	3360	6720

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

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

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агентій «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 2023 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2021 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 металопродукцій 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 СМΥΚ, роздільна здатність 300 dpi.



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, плазово- 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.

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 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>



Швидкий і простий метод зварювання TIG холодним дротом

Інноваційні компоненти для зварювання TIG холодним дротом, оснащені передовою технологією інтелектуального керування, тепер доступні й для системи Fronius iWave.

З новим запатентованим зварювальним комплектом TIG DynamicWire навіть початківці зможуть досягти неперевершених результатів під час зварювання TIG, не докладаючи для цього зайвих зусиль. А все тому, що система динамічного керування подачею дроту завжди визначає правильну швидкість переміщення. Тобто весь процес адаптується до вимог зварювальника, а не навпаки! TIG є процесом зварювання найвищого рівня, що вимагає володіння певними навичками.

Систему iWave із категорією потужності від 300і до 500і можна модернізувати й отримати систему з холодним дротом для зварювання TIG. Щоб почати роботу зі зварювальним комплектом TIG DynamicWire, достатньо просто активувати його програмне забезпечення. Крім того, комплект можна встановити на наявну систему iWave

у будь-який час. Новаторська особливість системи Fronius DynamicWire – функція автоматичного саморегулювання, яка відрізняє її від звичайних пристроїв безперервного подавання дроту. Зварювальна система активно регулює швидкість подавання дроту відповідно до особливостей процесу зварювання, положення пальника та умов подавання струму, автоматично компенсуючи при цьому допуски на деталі, що становлять до 30%. Результатом такої роботи стають ідеальні шви. Займаючись розробкою системи з холодним дротом, спеціалісти Fronius не пропустили жодної дрібниці, адже головною їхньою метою було забезпечення комфортних умов роботи для зварювальників – без зайвих процесів і налаштувань. Так, наприклад, пристрій подавання дроту встановлюється один раз, після чого залишається в незмінному положенні. Ергономічний і гнучкий тримач вирізняється особливою легкістю, адже його виготовлено з алюмінію методом об'ємного друку, що дає можливість зекономити матеріал. До того ж, в області руків'я пальника відсутні будь-які вібрації, які могли б заважати роботі. Це пояснюється тим, що, на відміну від аналогічних рішень, процес зварювання холодним дротом TIG DynamicWire не передбачає механічного переміщення дроту вперед і назад.

Компанія Fronius, яка є експертом в області зварювання, запатентувала ще одну новинку – систему швидкої фіксації електрода Tungsten Fast Clamp (TFC). Лише одним натисканням кнопки можна



Нові компоненти холодного дроту Fronius для системи iWave легкі й ергономічні. Це забезпечує гнучкість під час зварювання TIG



Завдяки запатентованій системі фіксації електрода TFC (Tungsten Fast Clamp) від'єднати й зафіксувати вольфрамовий електрод можна за лічені секунди одним натисканням кнопки



Автоматичне регулювання пристрою подавання дроту за допомогою зварювального комплекту TIG DynamicWire

від'єднати вольфрамовий електрод або зафіксувати його в пружинній затискній втулці. Процес займає лічені секунди – зовсім як заміна грифеля в механічному олівці. Таку систему тепер можна встановити й на корпусах наявних зварювальних пальників.

У разі нестачі кваліфікованих спеціалістів навіть новачки або менш досвідчені працівники зможуть досягти неперевершених результатів під час зварювання TIG – і все завдяки використанню системи iWave у поєднанні з пристроєм подавання холодного дроту й комплектом TIG DynamicWire. Функція самостійного регулювання параметрів і характеристик зварювання, а також активний компенсаційний пристрій подавання дроту гарантуватимуть високу якість і безпеку робочих процесів. Оскільки інтелектуальне зварювання TIG холодним дротом не передбачає безперервного руху дроту вперед і назад, навіть



TIG CW Feeding: нову систему пристроїв подавання холодного дроту можна з легкістю встановити на інтелектуальні зварювальні пальники TIG. Вона залишатиметься в незмінному положенні після першого ж калібрування

зношувані компоненти, як-от корпус чи кришка пальника або затискна втулка, не так швидко виходять із ладу та служать довше порівняно з деталями аналогічних пристроїв.

Fronius International — австрійська компанія з головним офісом в місті Петтенбах і відділеннями в містах Вельс, Тальхайм, Штайнхаус і Замтледт. Компанія, штат якої налічує 5660 співробітників по всьому світу, працює в галузях зварювального обладнання, фотовольтаїки та систем для заряджання акумуляторних батарей. Близько 92 % продукції компанії постачається на експорт за допомогою 36 міжнародних дочірніх компаній Fronius, а також мережі торгових партнерів і представників у більш ніж 60 країнах. Компанія Fronius пропонує інноваційні продукти та послуги, а також володіє 1321 чинними патентами, що робить її світовим лідером інновацій.



ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ –

продовжуємо працювати на економіку України

2022 рік видався одним із найважчих для нашої країни та українського народу. Повномасштабна агресія наклала відбиток на будь-яку сферу економіки та життя кожного українця. Але, як ми знаємо, успішні дії на фронті неможливі без надійного тилу, а тому стабільна робота українських підприємств зараз необхідна як ніколи. Розуміючи це, компанія ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ не припиняла свою роботу і попри всі труднощі і негаразди змогла продовжити стабільне функціонування і вже на початку літа вийшла на довоєнні обсяги виробництва продукції.

Окрім відновлення стабільного виготовлення зварювального обладнання та матеріалів, ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ вдалося реалізувати ряд проектів, які покликані забезпечити подальший розвиток та досягнення довгострокових цілей компанії.

Експорт. ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ експортує свою продукцію до понад 50-ти країн по всьому світу, і основним досягненням 2022 р. є розширення географії на нарощування об'ємів експорту.

Сьогодні продукція PATON постачається в такі країни, як Азербайджан, Вірменія, Болгарія, Казахстан, Грузія, Молдова, Саудівська Аравія, Лівія, Польща, Чехія, Словаччина, Латвія, Литва, Румунія, Узбекистан, Іспанія, Естонія, Італія, Коста-Рика, Нідерланди, Угорщина, Єгипет, Греція, Кіпр, Шрі Ланка, Португалія, Сербія, Ізраїль, Індія, Великобританія, Туреччина, Німеччина, Південна Ко-

рея, Хорватія, Бельгія, Данія, Чорногорія, Бахрейн, Австралія, Катар, Швеція, Кувейт, Йорданія, Ємен, ОАЕ, Нігерія, Екваторіальна Гвінея, Буркіна-Фасо.

Впродовж 10 місяців спеціалістам компанії з експорту разом із партнерами вдалося збільшити обсяг постачання продукції на ринки європейських країн, а також було посилено присутність компанії на європейському ринку за рахунок запуску фірмових інтернет-магазинів майже у кожній країні Європи. Наразі майже будь-який європейський покупець може зручно вибрати для себе продукцію PATON та отримати її впродовж 1-2 днів з моменту замовлення.

На початку року представники компанії взяли участь у міжнародній виставці «Steelfabme» у Дубаї з метою посилення позицій бренду на ринках ОАЕ та інших країн Близького Сходу. Внаслідок цих заходів вже активно розпочинається співпраця з рядом нових клієнтів даного регіону, а також за результатами тестування та на основі вимог клієнтів заплановано ряд заходів із адаптації зварювального обладнання PATON до роботи в екстремальних умовах екваторіального клімату.

Асортимент продукції. В 2022 р. інженери компанії активно працювали над розширенням асортименту зварювального обладнання. Було завершено розробку та запущено у виробництво нові моделі аргонодугових інверторних апаратів PATON StandardTIG-250, StandardTIG-270-400V,





StandardTIG-350-400V, промисловий мультифункціональний інвертор PATON MultiPro-350-15-4-400V та напівавтомат побутового класу – PATON EuroMIG. Також було виготовлено першу партію апаратів для абсолютно нового для компанії сегменту ринку – обладнання для мікрозварювання – PATON MicroWelding-80, який призначений для професійного виконання мікрозварювальних робіт (зварювання великим струмом – до 210 А впродовж дуже малого проміжку часу – від 1 до 30 мілісекунд) при ремонті прес-форм та штампів, ювелірних виробів, медичного обладнання тощо.

Поряд з новими розробками, інженерами ПАТОН ІНТЕРНЕТІОНЛ було вдосконалено ряд існуючих моделей обладнання, за рахунок чого було покращено їх характеристики, зокрема, підвищено клас захисту в напівавтоматах, аргондугових інверторах та апаратах повітряно-плазмового різання.

Синергетичне налаштування та роботизоване зварювання. Продовжується спільна робота компанії ПАТОН ІНТЕРНЕТІОНЛ зі спеціалістами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона щодо формування інформаційної бази, яка стане основою для розробки синергетичного налаштування апаратів для напівавтоматичного зварювання ПАТОН.

На основі перших етапів цього дослідження вже сформовано аргументовані рекомендації по налаштуванню режиму напівавтоматичного зварювання в апаратах ПАТОН, які вже сьогодні полегшують процес налаштування обладнання і дають можливість користувачам скоротити час на його підготовку до роботи. Дані рекомендації на-

разі містять налаштування режимів для вуглецевої сталі Ст3кп, низьколегованої сталі 09Г2С та високолегованих сталей 12Х18Н10Т та 20Х20Н14С з використанням зварювального дроту ER70-S6 (Св-08Г2С) та ER307Тi (Св-08Х20Н9Г7Т).

Ще одним важливим напрямком розвитку для компанії є галузь роботизованого зварювання. На попередньому етапі розробки цього напрямку інженери ПАТОН ІНТЕРНЕТІОНЛ модифікували програмне забезпечення зварювального обладнання, додавши можливість зберігати до 16 налаштованих програм користувача для кожного режиму зварювання (ММА, TIG, MIG/MAG). А нещодавно було завершено розробку блоку автоматичного управління ВАС-0001, за допомогою якого можна налагодити зв'язок та обмін інформацією між зварювальними напівавтоматами ПАТОН та зварювальними роботами від широкого ряду виробників. Блок управління здатен приймати та передавати опорні сигнали між зварювальним роботом та апаратом у трьох режимах: аналоговому, кроково-цифровому та цифровому. Це робить його універсальним та сумісним із найбільш популярними моделями роботів. Перша версія блоку вже використовується на реальному проєкті з розробки зварювальних роботів компанією Qweedo Robotics, де проходить експлуатаційне тестування разом із напівавтоматом PATON ProMIG-500-15-4-400V.

Таким чином, в якості підсумку можна сказати, що незважаючи на повномасштабну війну та складну економічну ситуацію, компанії ПАТОН ІНТЕРНЕТІОНЛ впродовж десяти місяців 2022 р. вдалося досягти неабияких результатів на шляху до своїх цілей. Компанія продовжує розробку нових та розвиток існуючих моделей обладнання, не зупиняє виробництво, забезпечуючи роботою персонал та виконуючи свої зобов'язання в рамках існуючих контрактів із контрагентами. Також вдається збільшувати обсяги відвантаження продукції споживачам в різних країнах, підтримуючи тим самим експортний потенціал держави, та гідно представляти український бренд ПАТОН на світовому ринку обладнання і матеріалів для професійного зварювання.

Комерційний директор ПАТОН ІНТЕРНЕТІОНЛ
Антон Степанко



Календар жовтня*

1 жовтня 1934

Президія АН УРСР затвердила першим директором Інституту електрозварювання Євгена Оскаровича Патона (1870-1953). Для визнання зварювання як надійного технологічного процесу знадобилися комплексні дослідження механіки зварювальних конструкцій, процесів металургії та металознавства зварювання, фізики дугового розряду; необхідно було створити апаратуру, матеріали та нові технології зварювання. Саме для цих цілей і був створений з ініціативи Є.О. Патона перший у світі інститут, який у наступні роки завоював лідируючі позиції у розвитку зварювальної науки та техніки.



2 жовтня 1934

Перший політ навчального АІР-9 – двомісного низькоплану з двигуном М-11 ОКБ Яковлева, пілотованого льотчиком Ю.І. Піонтовським. 4 липня 1937 р. льотчиці Ірина Вишневіська та Катерина Меднікова встановили жіночий міжнародний рекорд для легких літаків 1-ї категорії. Вони досягли висоти 6518 м. У конструкції літака було використано багато нових технологічних рішень. Фюзеляж літака фермовий, зварений із сталевих труб та додатково розчалений.



3 жовтня 1967

Експериментальний ракетоплан North American X-15A-2 розвинув швидкість 7273 км/год, що в 6,72 рази перевищує швидкість звуку. Перший і на протязі 40 років єдиний в історії пілотований гіперзвуковий літальний апарат-літак, що здійснив суборбітальні пілотовані космічні польоти. Характерною особливістю планера North American X-15 було широке застосування зварювання при його виробництві. Так, близько 70-80% у структурі ракетоплану являли собою зварні конструкції.



4 жовтня 1957

Було запущено першого штучного супутника Землі. Робота конструкторів та виробників при виготовленні супутника проводилася одночасно через дуже стислий термін. Основна складність була у виготовленні сферичних напівоболонки методом гідровитяжки, їх зварювання зі шпангоутом та поліруванням зовнішніх поверхонь: на них не допускалися навіть найменші подряпини; зварювання швів мало бути герметичним і контролювалося рентгеном, а герметичність зібраного контейнера перевірялася гелієвим течеукачем.



5 жовтня 1882

Народився Роберт Годдард (1882-1945) – американський вчений, один із піонерів сучасної ракетної техніки, творець першого рідинного ракетного двигуна. У 1914 р. зареєстровано два значних патенти в ракетотехніці. Перший, U.S. Patent 1102653, описував багатоступінчасту ракету. Другий, U.S. Patent 1103503, описував ракету, що працює на бензині і рідкому оксиді азоту. Годдард запустив свою першу ракету на рідкому паливі 16 березня 1926 р. на висоту близько 12 м. Створення ракетної техніки було б неможливо без застосування технологій зварювання та паяння. У відповідь на питання про його роботу після Другої світової війни Вернер фон Браун відповів: «Ви не знаєте про власного (США) першопрохідника ракетобудування? Доктор Годдард був попереду всіх нас».



6 жовтня 1893

Народився Мегнад Саха (1893-1956) – індійський фізик та астроном, член Лондонського королівського товариства (1927). Наукові роботи М. Саха належать до термодинаміки, статистичної фізики, астрофізики, теорії поширення радіохвиль, ядерної фізики. Важливою науковою основою для розвитку дугового зварювання стало вчення про іонізацію плазми. Для характеристики процесу іонізації М. Саха запропонував у 1921 р. рівняння, назване в подальшому його ім'ям. У розвиток цього рівняння в 1924 р. І. Ленгмюр вивів формулу для визначення ступеня іонізації парів речовини, що випаровується з нагрітих поверхонь.



7 жовтня 1985

Народився Нільс Бор (1885-1962) – данський фізик-теоретик і громадський діяч, один із творців сучасної фізики. Лауреат Нобелівської премії з фізики (1922). Відомий як творець першої квантової теорії атома й активний учасник розробки основ квантової механіки. Зробив значний внесок у розвиток теорії атомного ядра та ядерних реакцій, процесів взаємодії елементарних частинок із середовищем. Бор створив велику міжнародну школу фізиків і багато зробив для розвитку співпраці між фізиками всього світу.



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



8 жовтня 1936

Народився Вадим Миколайович Замков (1936-2005) – відомий вчений у галузі металургії та зварювання титанових сплавів. Серед робіт В.М. Замкова слід відзначити розробку нового способу аргонно-дугового зварювання титану за флюсом, який дозволив докорінно змінити технологію зварювання титану, і таким чином вирішити проблему підвищення якості зварних з'єднань. Під його безпосереднім керівництвом створено нові матеріали для зварювання титану: флюси і порошкові дріоти.



9 жовтня 1935

Співробітниками компанії Union Carbide Corp. запропоновано спосіб автоматичного дугового зварювання голим електродом під шаром гранульованого флюсу. Цей спосіб був названий «Unionmelt». За допомогою цієї технології зварювали сталеві листи завтовшки до кількох десятків міліметрів з високою швидкістю та чудовою якістю шва.



10 жовтня 1731

Народився Генрі Кавендіш (1731-1810) – британський фізик та хімік. У 1766 р. Кавендіш опублікував першу важливу роботу з хімії – «Штучне повітря», де повідомлялося про відкриття «пального повітря» (водню). Виділив (1766 р.) в чистому вигляді вуглекислий газ і водень, прийнявши останній за флогістон, встановив основний склад повітря як суміш азоту та кисню. Отримав оксиди азоту. Ці відкриття були важливою складовою для майбутнього розвитку технології автогенного зварювання.



11 жовтня 1968

Спущено на воду судно «Отто Ганн» – одне з чотирьох колись побудованих торгових суден з ядерною енергетичною установкою. Крім торгових функцій, судно також використовувалося як дослідницький корабель. Щоб забезпечити команду, було вирішено заварити реакторний блок у спеціальному великому відсіку. При цьому до зварних швів пред'являлися особливо жорсткі вимоги, для чого проводилися численні перевірки якості.



12 жовтня 1940

Радянський льотчик Володимир Коккінакі розпочинає випробування другого варіанта одномісного літака Іл-2 – радянського штурмовика. Він став наймасовішим бойовим літаком в історії авіабудування – загалом їх було випущено понад 36 тис. Фюзеляж літака був суцільнометалевим чи змішаної конструкції. Передня частина являла собою зварну оболонку (бронекорпус) із штампованих листів броні завтовшки 4-6 мм, з'єднаних клепоку та зварюванням. Була розроблена високопродуктивна технологія комбінованого зварювання елементів конструкції літаків.



13 жовтня 1940

Народився А.В. Демчишин – доктор технічних наук, представник Патонівської школи. До основних напрямків науково-технічної діяльності відносяться: створення наукових основ одержання конденсованих шарів металів, сплавів, тугоплавких сполук, дисперснозміцнених матеріалів та багатшарових композицій за допомогою електронно-променевого, магнетронного і вакуумно-дугового випаровування необхідних матеріалів у вакуумі, а також розробка відповідних технологій й обладнання для нанесення функціональних покриттів на деталі та виробу відповідального призначення. Автор більш ніж 150 наукових статей і патентів.



14 жовтня 1947

Відбувся перший в історії авіації надзвуковий політ. Його виконав пілот Чарльз Йегер на літаку «Bell X-1» з рідинним реактивним двигуном, який був запущений з літака носія «Boeing-B29» і досяг швидкості 2600 км/год. Планер літака був виконаний із високоміцного алюмінію, паливні баки були зварені зі сталі. Зварювання також застосовували для виготовлення деталей планера.



15 жовтня 1992

Опубліковано один з патентів Б.І. Медовара (1916-2000) – відомого вченого в галузі зварювання та металургії, академіка, представника Патонівської школи. З початку 1960-х років ним розроблено теоретичні основи металознавства та металургії зварювання аустенітних сталей. Займався питаннями наплавлення, переплаву та лиття. Є одним із співавторів технології електрошлакового зварювання. З 1979 р. керував роботами щодо створення нового класу конструкційних металевих матеріалів, отриманих методом електрошлакового переплаву.

16 жовтня 2014

Представлено модель нового покоління комп'ютерів iMac, головною особливістю якого став вражаюче тонкий дизайн. На презентації мимохіть було згадано про якусь революційну технологію зварювання, яка дозволила зробити корпус значно тоншим. «Безшовне, точне і надміцне з'єднання», – ось як описує переваги даної технології Apple. Як з'ясувалося, для з'єднання деталей нового iMac використовувалася технологія ротаційного зварювання тертям. Завдяки цьому з'єднання стало тоншим і Apple досягли товщини кромки корпусу комп'ютера товщиною всього 0,5 см.

**17 жовтня 2001**

Помер П.І. Севбо (1900-2001) – відомий конструктор та вчений, котрий довгий час очолював конструкторське бюро Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. Під час Другої світової війни колектив бюро під керівництвом П.І. Севбо оперативно розробив та впровадив десятки спеціалізованих апаратів та верстатів для автоматичного зварювання бронекорпусів танка Т-34. У повоєнні роки П.І. Севбо активно працював над розвитком та вдосконаленням зварювального обладнання для багатьох галузей промисловості. Розробив низку проектів, пов'язаних із комплексною автоматизацією зварювального виробництва.

**18 жовтня 1888**

Створений М.Г. Слов'яновим спосіб зварювання металевим електродом уперше був публічно, у присутності державної комісії, випробуваний при зварюванні колінчастого валу парової машини. Ця дата вважається днем народження електрозварювання. Було організовано перший у світі зварювальний цех (так звана електроливарна фабрика з електричним генератором).

**19 жовтня 1958**

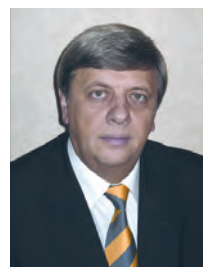
Завершилася Всесвітня виставка у Брюсселі, де однією з головних визначних пам'яток був Атоміум. Він став одним із символів Брюсселя – величезною сталевую спорудою, розташованою на північному заході столиці. Спроекований архітектором Андре Ватеркейном. За ідеєю творця його конструкція символізує початок нової доби – епохи науки, освоєння космосу та мирного використання атомної енергії. Ця незвичайна конструкція складається з 9 сфер «атомів», що представляє модель кристала заліза (Ferrum), збільшена в 165 мільярдів разів. Атоміум можна вважати гімном зварним конструкціям XX століття.

**20 жовтня 1480**

Народився Ванноччо Бірінгуччо (1480-1539) – італійський алхімік, металург та архітектор. Будучи відомим у Європі майстром-ливарником, займався виготовленням військової техніки у Флорентійській республіці. Тут у 1529 р. Бірінгуччо відлив одну з найбільших на той час гармат вагою понад 6 т і завдовжки 6,7 м. У своїй десяти томній праці «Піротехніка» він описує, зокрема, створення стику з'єднання з використанням ковальського зварювання за допомогою срібла, битого скла та інших матеріалів. Таким чином у цей час поєднувалися мечі та інші види зброї.

**21 жовтня 1954**

Народився І.В. Кривцун – відомий вчений, академік, директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Головний напрямок наукової діяльності І.В. Кривцуна – теоретичні дослідження і математичне моделювання фізичних явищ, що мають місце у низькотемпературній технологічній плазмі (зварювальні дуги, плазмові струмені, оптичний та інші види газового розряду), а також процесів взаємодії електродугової плазми та лазерного випромінювання з матеріалами, що оброблюються за умов дугового, плазмового, лазерного і гібридного зварювання, наплавлення та нанесення покриттів. Автор понад 200 наукових праць.

**22 жовтня 1967**

Під час проведення Всесвітньої виставки у 1967 р. відвідувачі могли познайомитися з найбільшим у світі просто неба геодезичним куполом, відомим як Монреальська біосфера. Купол побудований з використанням приблизно 65000 частин, у тому числі 13 км екструдованих алюмінієвих трубок, зварених у шестикутники. У ньому немає ніяких внутрішніх опор і вся 80-тонна конструкція лежить на п'яти заповнених бетоном пілонах.

**23 жовтня 1953**

Відбувся публічний показ найбільшого на той час вертольота УН-16 Transporter. Став першим у світі вертольотом із двома газотурбінними двигунами. Довжина важкого транспортного вертольота становила 24 м, діаметр двох несучих гвинтів 25 м. Такі розміри пояснювалися технічно заданою дальністю польоту – 2250 км. Під час будівництва гелікоптера вперше застосовувалося високоточне контактне зварювання.





24 жовтня 1804

Народився Вільгельм Едуард Вебер (1804-1891) – німецький вчений-фізик. Головні роботи вченого відносяться до галузі магнітних явищ та електрики. Ним було встановлено абсолютну систему електричних вимірів. На його честь названо одиницю вимірювання магнітного потоку. Вона була затверджена 1881 р. на Міжнародному електричному конгресі в Парижі.



25 жовтня 1954

Народився С.Ю. Максимов – відомий вчений, член-кор. НАН України, заступник директора з наукової роботи ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Основні напрямки наукових досліджень – теоретичні й технологічні аспекти ручного і механізованого зварювання під водою, фізико-металургійні особливості взаємодії розплавленого металу з газами, розробка електродних матеріалів, технологій й обладнання для зварювання та різання сталей під водою. Автор понад 300 наукових праць.



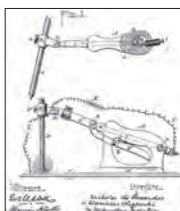
26 жовтня 1964

Опубліковано патент Родріка Рорберга на апарат для орбітального зварювання. Орбітальне зварювання є спеціалізованим способом зварювання, при якому дуга механічно повертається на 360 градусів навколо предмета, що зварюється. Цей вид зварювання використовується насамперед для зварювання труб у машинобудуванні.



27 жовтня 1931

Народився В.І. Махненко (1931-2013) – академік, представник Патонівської школи. У 1955 р. закінчив Одеський інститут інженерів морського флоту, за фахом інженер-кораблебудівник. З 1964 р. працював в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, де безпосередньо за його участі було створено відділ математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецелектрометалургії та обчислювальний центр. Світове визнання отримали роботи В.І. Махненка в дослідженні термомеханічних процесів при зварюванні, спецелектрометалургії, створенні розрахункових методів дослідження кінетики зварювальних напружень та деформацій, а також їх впливу на працездатність зварних з'єднань і вузлів. Ним підготовлено понад 25 кандидатів та 5 докторів наук.



28 жовтня 1885

У Британії Миколі Бенардосу та Станіславу Ольшевському видано патент на спосіб електрозварювання «Електрогефест». Це був один з перших патентів, отриманих Бенардосом, а також перший патент на зварювання у Великій Британії. Отримання патенту стало першим кроком у світовому визнанні винаходу прогресивного способу з'єднання металів за допомогою електрики.



29 жовтня 2013

Спущений на воду ескадрений міноносець типу Zumwalt. Есмінець є ключовою частиною програми SC-21 ВМС США. Програма, розпочата у 1991 р., спрямована на створення сімейства універсальних кораблів нового покоління. Есмінци цієї серії є багатоцільовими і призначені для атаки супротивника на узбережжі, боротьби з авіацією супротивника та вогневої підтримки військ з моря. Розробка цього типу корабля – одне з останніх досягнень військової техніки. Під час реалізації цього проекту широко використовувалося електродугове зварювання з підвищеними вимогами до якості зварних швів.



30 жовтня 1961

На Новій Землі було підірвано найпотужніший вибуховий пристрій історії людства. Розробкою бомби-виробу АН 602 керувала АН СРСР. Маса зварної бомби склала 26,5 т, довжина 8 м. Потужність вибуху 575 мегатонн у тротиловому еквіваленті.



31 жовтня 1935

Завод-виробник представив на полігонні та заводські випробування перший дослідний варіант літака ДІ-6 (ЦКЛ-11) – радянського двомісного винищувача. У процесі виробництва цього винищувача при зварюванні лонжеронів крила вперше в СРСР застосовувалося атомно-водневе зварювання. Фюзеляж ДІ-6 фермовий, зварений із сталевих труб, з легким зовнішнім каркасом, обшитим в задній частині полотном. Пізніше літак почав випускатися зі зварними паливними баками.