

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 4 З В А Р Ю В А Н Н Я 2024

Avtomatychne Zvaryuvannya

Видається з 1948 р.

Published since 1948

ЗМІСТ

НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

Колісніченко О.В., Коржик В.М., Стухляк П.Д., Кільдій А.І., Товбін Р., Шинлов М., Мудріченко В. Розвиток технології детонаційного газового напылення покриттів в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (Огляд)3

ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Y. Zhao, X. Wang, Z. Liu, V. Khaskin Вплив випромінювання твердотільного лазера на процес імпульсно-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1561 15

ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ

Бризгалін А.Г., Пекар Є.Д., Венцев С.Д., Пащин М.О., Шльонський П.С. Отримання коаксіальних з'єднань різних металів за допомогою вибуху 24

МЕТАЛОЗНАВСТВО

Яровицін О.В., Черв'яков М.О., Наконечний О.О., Фомакін О.О., Воронін С.О., Явдошина О.Ф. Високотемпературні випробування на довготривалу міцність зразків з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів з мікроплазмовим порошковим наплавленням 32

Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П., Нягай Е., Чуприньки А. Зварювально-технологічні властивості порошкового дроту з шихтою у вигляді гранульованого порошку .. 42

Царик Б.Р., Махненко О.В. Математичне моделювання загальних деформацій при зварюванні великогабаритних ємностей з алюмінієвих сплавів 47

ІНФОРМАЦІЯ

Розвиток контактної-стикового зварювання великогабаритних деталей 55

Тенденції і технології у зварювальній індустрії: бачення «ДНІПРОМЕТІЗ ТАС» 58

XXII Міжнародний промисловий форум 60

I Міжнародна науково-технічна конференція «Прикладна механіка» 62

CONTENTS

COATINGS DEPOSITION

Kolisnichenko O.V., Korzyk V.M., Stukhlyak P.D., Kildiy A.I., Tovbin R., Shinlov M., Mudrichenko V. Development of detonation gas spraying technology of coatings in the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU (Overview)3

LASER TECHNOLOGIES

Y. Zhao, X. Wang, Z. Liu, V. Khaskin. Influence of solid-state laser radiation on the process of pulsed-arc welding of aluminium alloy 1561 15

EXPLOSION WELDING TECHNOLOGY

Bryzgalin A.G., Pekar E.D., Ventsev S.D., Pashchin M.O., Shlionskyi P.S. Producing of coaxial joints of dissimilar metals with the help of explosion 24

METAL SCIENCE

Yarovytsyn O.V., Chervyakov M.O., Nakonechniy O.O., Fomakin O.O., Voronin S.O., Yavdoshchina O.F. High-temperature creep testing of difficult-to-weld nickel-based superalloy samples with micro-plasma powder deposition 32

Riabtev I.O., Babinets A.A., Lentiugov I.P., Niagaj J., Czuprynski A. Welding and technological properties of flux-cored wire with the charge in the form of granular powder 42

Tsaryk B.R., Makhnenko O.V. Mathematical modeling of overall distortions at welding of large-sized vessels of aluminum alloys 47

INFORMATION

Development of flash-butt welding of large details 55

Future trends and technologies in the welding industry: Vision of DNIPROMETYZ TAS 58

XXII International industrial forum 60

I International scientific and technical conference «Applied Mechanics» 62



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



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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (Київ):
І.В. Кривцун (головний редактор),
О.М. Берднікова, В.В. Книш,
В.М. Коржик, Ю.М. Ланкін,
Л.М. Лобанов, С.Ю. Максимов,
О.В. Махненко, М.О. Пашин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,
І.Ю. Романова – відповідальний секретар;
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;
У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,
Аахен, Німеччина.
Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко,
Міжнародна Асоціація «Зварювання», Київ

Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ, 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

Журнал зареєстровано Національною радою України з
питань телебачення і радіомовлення 9 травня 2024 року,
ідентифікатор медіа R30-04566.

ISSN 0005-111X

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

Передплата 2025

Передплатний індекс 70031.

6 випусків на рік (видається раз на два місяці).

Друкована версія: 1800 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 1800 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.

Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевідаються англійською мовою в журналі

«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute
of NASU (Kyiv):
I.V. Krivtsun (Editor-in-Chief),
O.M. Berdnikova, V.V. Knysh,
V.M. Korzhyk, Yu.M. Lankin,
L.M. Lobanov, S.Yu. Maksimov,
O.V. Makhnenko, M.O. Pashchin,
V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev,
I.Yu. Romanova – Executive Secretary;
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;
U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany.
Executive Director – O.T. Zelnichenko,
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Publisher

International Association «Welding»

Editorial office

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv, 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 publishing Editorial Board of the Journal

The Journal was registered by the National Council of Ukraine
on Television and Radio Broadcasting on 09.05.2024,
carrier identifier R30-04566.

ISSN 0005-111X

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

Subscription 2025

Subscription index 70031.

6 issues per year, back issues available.

\$192, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$156, 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 «Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)
journal is republished selectively in English in
«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

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

Підписано до друку 30.07.2024.
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7,7.
Друк ТОВ «ДІА». 03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЇ ДЕТОНАЦІЙНОГО ГАЗОВОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ В ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАНУ (Огляд)

О.В. Колісніченко¹, В.М. Коржик¹, П.Д. Стухляк³, А.І. Кільдій¹, Р. Товбин², М. Шинлов²,
В. Мудріченко³

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

²Sputtek Inc. 110 Share Road, Vaughan, Ontario, Canada, L4L 8P4. E-mail: mshynlov@gmail.com

³Науково-дослідний інститут зварювальних технологій імені Патона в провінції Чжецзян, КНР, провінція Чжецзян, м. Ханчжоу, район Сяошань, вул. Шісін Бейлу 857, оф. 426. E-mail: vladyslav.mudrichenko@ukr.net

Незважаючи на те, що метод детонаційно-газового напилення є високотехнологічним процесом, що дозволяє наносити на вироби покриття високої якості, він має деякі недоліки, які можуть обмежувати його широке застосування в промисловості в порівнянні з іншими методами газотермічного нанесення покриттів. До таких недоліків можна віднести підвищені вимоги до техніки безпеки, невисоку продуктивність і надійність конструкції. Проте використання новітньої елементної бази, накопичений технологічний досвід, сучасні дослідження в області детонаційних процесів, нові підходи до конструювання детонаційних установок дозволяють сподіватися, що детонаційно-газовий метод отримає значне поширення на рівні з такими методами, як плазмове або високошвидкісне газополуменеве напилення. У статті показано провідну роль вчених та інженерів України в розробці та впровадженні детонаційно-газового напилення покриттів. Особливу увагу приділено роботам, що проводяться в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Показано концепції та етапи розвитку конструкції від класичних детонаційних гармат до безклапанних багатокамерних гармат, що працюють на підвищеній частоті. На їх основі з використанням сучасної елементної бази та обладнання створено автоматизовані промислові комплекси, що дозволяють ефективно використовувати переваги детонаційно-газового напилення. Бібліогр. 23, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: детонація, покриття, детонаційно-газова установка, безклапанна конструкція, камера згоряння, промислова ділянка

Вступ. Швидкість згоряння палива, надзвукова швидкість процесу, висока температура та підвищений тиск продуктів згоряння визначають області технічного використання газової детонації. Одним з перших найважливіших і добре розвинених у даний час супутніх процесів до газової детонації є нанесення зносостійких, теплозахисних, корозійностійких та інших видів порошкових покриттів на поверхні деталей різного призначення. Суть методу полягає в нагріванні та транспортуванні порошкових частинок на поверхню, яка напилюється, за допомогою газової детонації.

Розвиток детонаційного методу напилення є перспективним у контексті наявності особливостей, характерних тільки для цієї технології в порівнянні з іншими численними методами газотермічного нанесення покриттів. Циклічність процесу, ефективність використання енергії згоряння горючої суміші, відносна простота конструкції детонаційних установок та ін. дозволяють реалізувати певні переваги методу детонаційного напилення, а саме:

– при однаковій кількості порошку, що напилюється, витрата компонентів горючої газової суміші буде меншою при використанні детонаційного режиму горіння в порівнянні з дефлаграційним режимом;

– установки детонаційного напилення не потребують коштовних систем охолодження;

– низька кількість споживаної електроенергії. Детонаційна гармата споживає 100 Вт, що достатньо для створення іскри замість, наприклад, тисяч Вт для установок плазмового напилення;

– детонаційні комплекси можуть використовувати звичайну недорогу систему подачі газу зі стандартними шлангами, де тиск у магістралях не перевищує 0,3 МПа. У системах надзвукового газополуменевого напилення (HVOF) він може становити 1 МПа і вище;

– можливість виконувати складніші завдання, наприклад напилення покриттів без перегріву виробів. Напилюваний об'єкт нагрівається до температури не вище 250 °С, що дозволяє уникнути термічних деформацій різних деталей або наносити покриття на тонкостінні вироби.

Колісніченко О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4507-9050>, Коржик В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,

Стухляк П.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-9067-5543>, Кільдій А.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8133-8705>,

Шинлов М. – <https://orcid.org/0009-0003-2679-9850>, В. Мудріченко – <https://orcid.org/0009-0005-8311-2685>

© О.В. Колісніченко, В.М. Коржик, П.Д. Стухляк, А.І. Кільдій, Р. Товбин, М. Шинлов, В. Мудріченко, 2024

Але, найголовніше, при виборі детонаційного методу напилення керуються якістю одержуваних покриттів, а саме:

- високою щільністю (пористість <1 %) через більшу швидкість частинок;
- підвищеною зносостійкістю завдяки твердішим і міцнішим покриттям;
- вищою твердістю за рахунок меншого розкладання карбідних фаз при напиленні металокерамічних покриттів;
- покращеним захистом від корозії завдяки зменшенню наскрізної пористості;
- вищою міцністю зчеплення з основою та підвищеною когезійною міцністю покриття;
- нижчим вмістом оксидів завдяки меншому часу польоту та нагріванню продуктами згоряння напилюваного порошку;
- збереженням хімічного складу порошку за рахунок скорочення часу перебування при високій температурі;
- низьким рівнем залишкових напружень;
- меншою шорсткістю поверхні після напилення завдяки вищій швидкості удару та меншій фракції порошку.

Високе значення кінетичної енергії струменя по відношенню до теплової складової роблять цей метод кращим для таких застосувань, як напилення зносостійких покриттів з металокераміки, де нижчі температури процесу запобігають зневуглицюванню, а високі – швидкості, створюють відносно практично безпористі покриття в стані з мінімальними залишковими напруженнями, що робить їх менш схильними до розтріскування.

Розвиток технологічних установок детонаційно-газового напилення. Вперше питання про використання детонації для отримання корисної роботи в енергетичних установках було поставлене Я.Б. Зельдовичем у 1940 р. Згідно з його статтею «До питання про енергетичне використання детонаційного горіння» [1] термодинамічна ефективність детонаційних установок значно перевищує ККД установок з дефлаграційним спалюванням палива. Це обумовлено тим, що продукти детонації мають меншу ентропію в порівнянні з продуктами звичайного горіння, а при ізоентропічному розширенні велика частина хімічної енергії переходить у корисну роботу. Як наслідок, використання детонаційної гармати буде дещо економішним в порівнянні з HVOF.

Детонаційно-газову установку для напилення вперше було розроблено та запатентовано в США фірмою «Union Carbide Corp» у 1955 р. [2]. Початковий етап вивчення методу та розробки уста-

новок для його реалізації детально викладено у [3, 4]. Створення цього винаходу було пов'язано з дослідженнями детонації ацетилену для пошуку безпечних методів його зберігання і транспортування, проведеними в кінці 1940-х рр. фірмою «Linde Company». Результати досліджень вперше показали, що руйнівна сила газової детонації може бути використана для виконання корисної роботи. Зусилля дослідників були спрямовані на розробку процесу нанесення шару твердих покриттів з поліпшеними властивостями в порівнянні з покриттями, одержуваними іншими методами напилення. Ця технологія, відома як Detonation Gun process, стала основою торгово-промислової діяльності «Linde Division». Розробка способу та першої установки детонаційно-газового напилення забезпечувала створення найкращих покриттів. Фірма створила широку мережу спеціалізованих заводів з нанесення та обробки покриттів, розташованих в Японії, Німеччині, Канаді, Великобританії, Швейцарії, і протягом тривалого часу підтримувала монополію на унікальну технологію.

Багато переваг детонаційного напилення були очевидні для фахівців відразу ж після появи першої інформації про нову технологію. Проте нікому не вдалося досягти цього рівня властивостей іншими методами, хоча такі спроби робилися численними дослідниками в багатьох країнах світу. Багато в чому така ситуація пояснювалася монополією компанії «Prahaair» (колишня назва – «Union Carbide Corp») і відсутністю можливості придбати її обладнання.

У 1960-х рр. у Києві під керівництвом академіка Г.В. Самсонова розпочалися роботи з освоєння технології детонаційного газового напилення в Інституті проблем матеріалознавства АН УРСР [5, 6]. На той момент часу практично були відсутні відомості про фізичні основи процесу, а численні публікації в західній пресі носили в основному рекламний характер. Дослідження також почали проводитися в Дніпропетровських хіміко-технологічному (О.Д. Корнєв, В.І. Шинкаренко та ін.) і металургійному (Т.П. Шмирьова, Г.М. Воробйов) інститутах, Ворошиловградському машинобудівному інституті (Ю.О. Харламов, Б.Л. Рябошапко та ін.), ВО «Київарматура» (О.І. Зверєв, В.І. Шестерненко), ЦКБ «Ленінська кузня» (м. Київ), Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона АН УРСР (м. Київ), ВАТ «Мотор-Січ» (м. Запоріжжя) та в інших організаціях. Пізніше до досліджень приєдналися Харківський авіаційний інститут, Науково-дослідний інститут технології машинобудування (м. Харків), Фізико-механічний ін-

ститут ім. Г.В. Карпенка (м. Львів). Дослідження були зосереджені на вивченні стаціонарних процесів газової детонації. Вивчалися газодинамічні параметри процесу напilenня, здійснювалася оцінка енергетичного стану частинок напильованого матеріалу та з'ясування механізму формування шару покриття.

Для здійснення процесу нанесення покриттів використовувалися детонаційні установки, побудовані за загальним принципом, до складу яких входили: камера згоряння у вигляді циліндричного ствола, газорозподільний пристрій, система запалювання, дозатор порошку та система управління установками за заданою циклограмою. Для роботи установки в якості окисника використовували кисень, а в якості горючого газу – ацетилен. Так з'явилися перші вітчизняні детонаційно-газові установки (ДГУ): спочатку – дослідні зразки «Союз» і «Блискавка», а потім і перші промислові ДГУ – «Дніпро» (ІПМ АН УРСР) та ін. У 1990-х рр. за участю фахівців ІПМ НАН України було створено детонаційно-газові установки – АДМ-2 і АДМ-4.

Незважаючи на те, що всі традиційні конструкції детонаційних установок побудовані за загальним принципом, вони відрізняються за способом введення напильованого матеріалу – осьова подача або радіальна; за способом подачі горючої суміші – камери прямого або попереднього змішування; за способом ініціювання детонації – прямий або форкамерний підпал.

Розвиток технології детонаційного напilenня в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. З 1980-х рр. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України під керівництвом Є.А. Астахова було розпочато роботи з дослідження процесу детонаційно-газового напilenня [7–10]. З урахуванням основних положень теорії газової детонації проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень щодо вибору та розробки оптимальних конструкцій вузлів ДГУ. Сформульовано вимоги до основних вузлів установки та систем газорозподілу та управління, основні принципи розробки детонаційного обладнання. З урахуванням характеристик і властивостей порошків (густини, дисперсності, питомої поверхні, насипної маси, газопроникності та ін.) розроблено живильники для ДГУ, що працюють зі скорострільністю 1...8 Гц. Вивчено вплив способу введення порошку (поперечний, осьовий, імпульсний, безперервний) на забезпечення стабільної щільності газопорошкової суміші по довжині ствола. Проведено комплексні дослідження покриттів з різних поро-

шків. За основу було взято конструкції ДГУ, розроблені в Інституті проблем матеріалознавства АН УРСР. Тоді ж проведено роботи, пов'язані з промисловим освоєнням детонаційного напilenня покриттів. Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона та Інститутом надтвердих матеріалів НАН України розроблено установки серії «Перун», а в НВО «Оргтехавтоматизація» (м. Сімферополь, Україна) освоєно їх дослідно-промисловий випуск. Установки є істотно різними за конструкцією та умовами експлуатації, але більшість вузлів установок було уніфіковано. Це дозволило виробляти комплектацію обладнання в різних блокових з'єднаннях. Автоматизований детонаційний комплекс (АДК) «Перун-С» [11] є одним з характерних представників даного класу установок. Він має наступні принципові технологічні можливості:

- експлуатація розробленого обладнання можлива при використанні різних робочих газів (в якості пального, крім ацетилену, може застосовуватися пропан–бутан або водень), а для транспортування порошку, продувки змішувача та ствола, розведення вибухової суміші допустимо використання як азоту, так і стисненого повітря;

- управління властивостями напильованих покриттів за рахунок зміни в широких межах температури та швидкості напильованих частинок у момент формування шару покриття і впливу на ступінь їх окислення та зміни хімічного і фазового складу;

- напilenня на великих поверхнях покриття з мінімальним припуском на обробку, що забезпечується стабільною роботою дозатора (зміна величини дози порошку, що вдувається, в процесі роботи не більше 8 %) і використанням комп'ютерної програми для переміщення установки;

- оснащення установки двома незалежно керованими порошковими дозаторами, що забезпечують перехід з режиму детонаційно-абразивної обробки на режим нанесення покриттів без викликання установки; здійснення процесу абразивної обробки і напilenня в одному циклі; напilenня двокомпонентного покриття без попереднього приготування порошкових сумішей і регулювання їх процентного вмісту.

Як і у всіх класичних детонаційних установках, в комплексі «Перун-С» використовується циліндричний ствол постійного діаметра для реалізації режиму стаціонарної детонації і подальшого нагріву та прискорення порошку. Як і в більшості відомих ДГУ, для періодичної подачі горючої суміші та порошкового матеріалу в установці використовуються електромеханічні клапани. На рис. 1

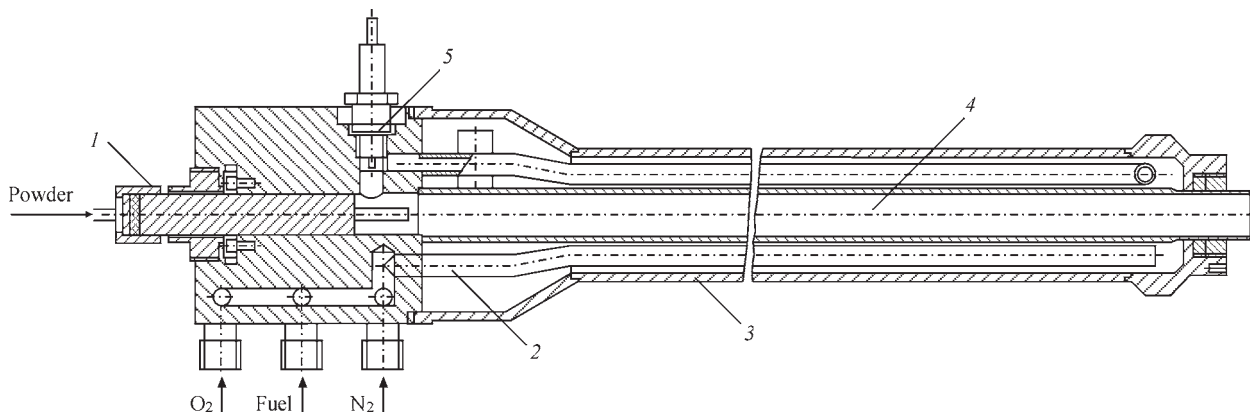


Рис. 1. Детонаційна гармата «Перун-С»

показано конструкцію детонаційної гармати «Перун-С». В установці реалізовано імпульсно-осьову подачу порошку через вузол 1 за заздалегідь заданою циклограмою під кожен імпульс. Горючий вуглеводневий газ і кисень подаються під тиском 1,2 атм магістраллю 2, розміщеною всередині сорочки охолодження 3. Після заповнення до заданого рівня горючою сумішшю циліндричного ствола 4 здійснюється підпал суміші свічкою 5. У результаті відбувається нагрів і прискорення попередньо поданої в ствол порції порошку. Далі детонаційна установка продувається за заздалегідь заданою циклограмою азотом або повітрям, що подається під тиском 3 атм. Підвищений тиск дозволяє замикати магістралі пального газу і кисню під час продувки установки та використовувати електромеханічний клапан тільки в газовій магістралі продувки.

Детонаційна установка «Перун-С» – високоефективний стаціонарний комплекс, ефективне промислове використання якого особливо було виявлено при масовому і великосерійному виробництві виробів з покриттями. Технічні характеристики комплексу «Перун-С» наведено в табл. 1.

Як показала практика, електромагнітні клапани успішно працюють в установках з частотою генерації детонаційних хвиль у газових сумішах до десяти Гц. Проте при роботі на вищих частотах клапанна система створює великі труднощі. Підвищення ж частоти роботи ДГУ дозволяє підвищити продуктивність і коефіцієнт використання порошку. Як наслідок, паралельно з вивченням детонаційного напilenня на класичних конструкціях ДГУ для вирішення завдання підвищення ефективності процесу в ІЕЗ ім. Є.О. Патона під керівництвом Ю.М. Тюріна почалися проводитися роботи з конструювання безклапанних детонаційних установок, а також вивчення можливості використання нестационарної перестисненої детонації для нанесення покриттів [12–17].

На рис. 2 показано ескіз одного з перших безклапанних детонаційних пристроїв. Використання

Таблиця 1. Технічні характеристики комплексу «Перун-С»

Параметр	Величина
Частота проходження робочих циклів, Гц	3,3...6,6
Площа покриття за цикл, мм²	320
Товщина покриття за цикл, мкм	3...10
Продуктивність напильовання порошку, кг/год	1...3
Коефіцієнт використання порошку, %	30...60
Витрати робочого газу, м³/год:	
ацетилену	0,65...1,2
пропан-бутану	0,6...1,1
водню	2...3,6
кисню	1,3...4,0
азоту	4,6...5,2
стисненого повітря	4,6...5,2
Потужність, кВт	2
Напруга живлення, В	220, 380
Частота, Гц	50
Межі переміщення трикоординатного маніпулятора, м:	
праворуч – ліворуч	1,6
вперед – назад	0,85
вверх – вниз	0,20

форкамери 4 дозволяє ініціювати детонацію газової суміші автомобільною свічкою 7. При виході з отворів 5, рівномірно розподілених по колу, детонація розвивається в основному об’ємі 6 детонаційної установки. Діаметр ствола 1 менше діаметра камери згоряння, що примикає. Це дозволяє реалізувати перестиснутий режим детонації. Порошок подавався радіально в ствол імпульсним порошковим живильником 2. Пристрій мав водяне охолодження 3.

Незважаючи на численний ряд спроектованих в ІЕЗ ім. Є.О. Патона експериментальних конструкцій безклапанних ДГУ, їх робота заснована на одному й тому ж принципі. Робота без-

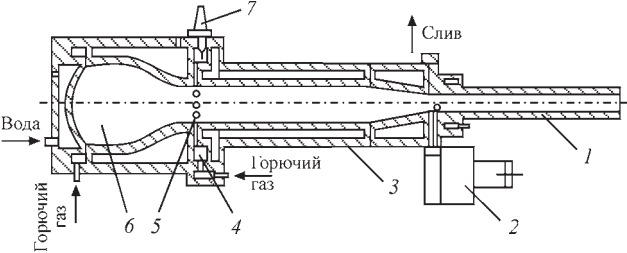


Рис. 2. Безклапанний детонаційний пристрій

клапанних установок в імпульсному режимі реалізується за рахунок газодинамічних процесів у магістралях подачі пального та окисника, в результаті яких відбувається переривання з необхідною частотою подачі пального та окисника в детонаційну камеру згоряння (ДКЗ) і запобігання неконтрольованому підпалу нової порції горючої суміші продуктами згоряння попереднього циклу. Сам процес полягає в наступному. У камері формується горюча суміш. Підпал суміші призводить до виникнення детонаційної хвилі (ДХ) і, отже, до підвищення тиску в ДКЗ. У той момент, коли тиск у ДКЗ починає перевищувати тиск у підвідних магістралях, який зазвичай не перевищує 300 кПа, відбувається затікання продуктів згоряння у відповідні магістралі. Тим самим переривається надходження свіжого пального і окисника в ДКЗ. Іншими словами, «газодинамічний клапан» закритий. При русі в газових магістралях продукти детонації охолоджуються. Для стабільної роботи та виключення самозаймання довжина і діаметр магістралей підбирається дослідним шляхом. Після виходу ДХ з камери згоряння всередині останньої назустріч потоку продуктів детонації починає поширюватися хвиля розрідження. Досягнувши магістралей подачі пального та окисника, вона поширюється по каналах, і через деякий час тиск у продуктах згоряння зменшується, що викликає зворотний рух газів у магістралях. Таким чином, «газодинамічні клапани» відкриваються. Починається зворотний витік вже охолоджених продуктів згоряння в камеру. Це аналогічно процесу продувки камери згоряння інертним газом, що має місце в роботі клапанних детонаційних систем. Далі відбувається заповнення ДКЗ новою сумішшю газів. При цьому між горючою сумішшю та гарячими продуктами згоряння, температура яких перевищує температуру самозаймання горючої суміші, розташовуються охолоджені продукти згоряння, що запобігає запаленню свіжої суміші газів, що надходить. Після заповнення ДКЗ проводиться чергова ініціація детонації і цикл повторюється. Період часу, протягом якого після підпалу горючої суміші ДКЗ знову заповнюється свіжою сумішшю, включає в себе сумарний час: переходу дефлаграції в детонацію; поширення ДХ в ДКЗ; витік продуктів згоряння з ДКЗ у навколишній простір; витік охолоджених продуктів згоряння з магістралей пального і окисника в ДКЗ; заповнення ДКЗ горючою сумішшю.

У загальному випадку максимальна частота роботи установки залежить від довжини камери

згоряння, її діаметра, довжини магістралей подачі пального та окисника, їх діаметра, тиску в них, виду пального та окисника, їх співвідношення. Знаючи всі ці параметри, можна оцінити граничну частоту роботи ДКЗ. Сучасні безклапанні ДУ для напилення покриттів дозволяють працювати з частотою до 100 Гц і вище. Наприклад, слід зазначити конструкцію пристроїв, що використовують високочастотний імпульсний процес детонації (HFPD) [18, 19]. На їх основі створено низку детонаційних установок, які дозволяють наносити якісні покриття з високою ефективністю. Зокрема, добре зарекомендувала себе модифікація HFPD-РК 200 «Aerostar Coatings» (Іспанія) для напилення металевих порошків, оксидів і металокераміки [20]. Наразі на ринку обладнання для газотермічного напилення центр прикладних досліджень і технологічних розробок «Тесналіа» (Іспанія) пропонує систему HFPDneo, яка забезпечує підвищену продуктивність і можливість працювати з використанням різних горючих газових сумішей у широкому діапазоні частот (до 100 Гц і вище). Поштовхом до розвитку безклапанних детонаційних гармат нового покоління, що працюють на високій частоті, послужили дослідження та практичні результати в області створення імпульсних детонаційних двигунів. Як приклад слід зазначити розробки «Hiroshima University» [21]. Створена ними високочастотна детонаційна гармата дозволяє наносити покриття з частотою 150 Гц [22]. Стабільна робота детонаційної гармати в такому разі забезпечується за рахунок подання горючої суміші в режимі продувки детонаційних камер інертним газом або в режимі продувки парами рідини, що інjektується [23]. Роботи зі збільшення частоти, оптимізації подання горючої суміші та конструкцій детонаційних камер даного класу пристроїв продовжуються.

До основних проблем, пов'язаних з розробкою установок, що використовують явище детонації, слід віднести кероване надійне ініціювання детонації в камері згоряння. З технічної точки зору найбільший інтерес при проєктуванні детонаційних установок, використовуваних для напилення покриттів, становить початковий підпал горючої суміші слабкішим джерелом енергії з можливістю подальшої реалізації переходу горіння в детонацію (ПГД). З цієї метою часто використовуваним способом ініціювання прискореного ПГД є формування детонації в результаті прискорення полум'я в окремому каналі (форкамері) і перепуск в основний об'єм камери згоряння.

Під час проєктування цьому вузлу слід приділяти особливу увагу. Авторами розроблено кіль-

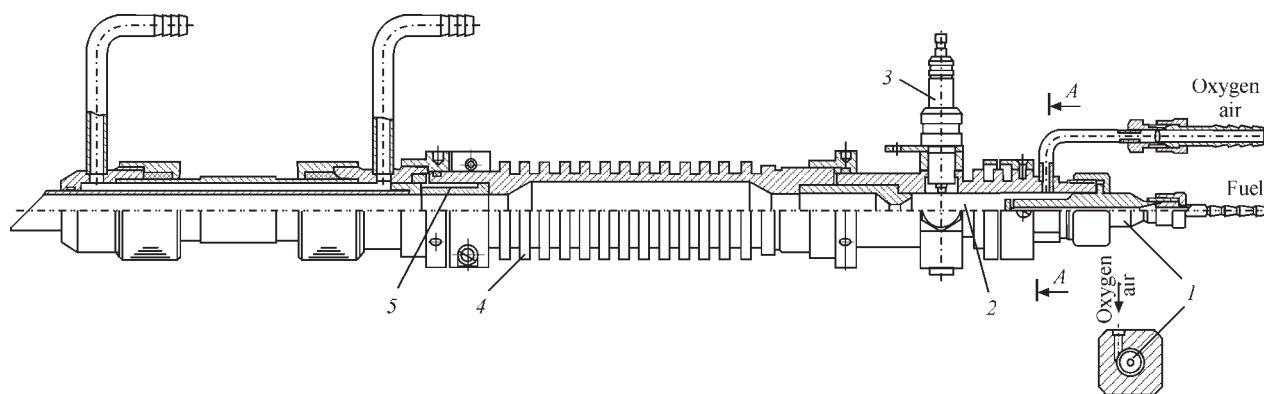


Рис. 3. Безклапанний детонаційний пристрій з циліндричною форкамерою

ка конструкцій форкамер, що дозволяє реалізовувати детонаційний режим згоряння в приєднаних ДКЗ, які мають різну геометрію. Як приклад на рис. 3 показано ескіз робочого лабораторного пристрою з повітряним охолодженням ДКЗ. Щоб уникнути перегріву, максимальна частота детонації в розглянутій ДГУ не перевищує 12 Гц. Горючий газ (у даному випадку пропан) подається через жиклер 1 у форкамеру 2. У жиклері для подачі пального газу в радіальному напрямку просвердлено отвори малого діаметра. Окисник (кисень або суміш кисню з повітрям) подається радіально по дотичній до внутрішньої циліндричної поверхні форкамери, тим самим надаючи цьому потоку кутову швидкість. Така подача компонентів горючої суміші дозволяє здійснити їх рівномірне перемішування. Ближче до виходу з форкамери розташовано свічку запалювання 3. Для створення умов детонації в кінці форкамери є звуження. Після підпалу та детонації фронт ударної хвилі виходить з форкамери і детонація розвивається в прилеглій ДКЗ 4. У даній конструкції на виході з ДКЗ за рахунок звуження площі поперечного перерізу камери (діаметром 30 мм) до площі перетину циліндричного ствола (діаметром 16 мм) під кутом нахилу утворюваного конуса 35° реалізується режим перестискання. Оскільки перестиснута хвиля на відстані в кілька калібрів у циліндричному стволі переходить у стаціонарну ДХ Чепмена-Жуге (ЧЖ), для ефективного прискорення та нагрівання порошку його бажано подавати на початку циліндричної частини ствола, що й було реалізовано в розглянутій конструкції. Безпосередньо на початку ствола через спеціальний вузол 5 радіально подається порошок, що нагрівається і прискорюється областю газу з підвищеним швидкісним напором.

У ДКЗ змінного поперечного перерізу ступінь перестискання ДХ α визначається наступним співвідношенням: $\alpha = D_*/D_{CJ}$, де D_* і D_{CJ} – швидкості перестисненої ДХ і детонації ЧЖ відповідно.

Як показують розрахунки [24], вже невелике збільшення швидкості ДХ призводить до різкого зростання таких характеристик продуктів детонації, як тиск p_* , щільність ρ_* , масова швидкість u_* . Хоча зростання температури продуктів детонації і компенсується частково процесами дисоціації, проте він також помітний. Тому перестиснені ДХ можуть слугувати джерелом імпульсних потоків продуктів детонації з параметрами, що помітно перевищують ті, які можна отримати при детонації ЧЖ, чим і визначається область їх можливих застосувань при нанесенні порошкових покриттів газодетонаційним методом.

Оцінку тиску, щільності на фронті перестисненої ДХ і швидкості продуктів детонації у залежності від ступеня перестиснення можна визначити зі співвідношень, наведених у [25]. Для ДКЗ детонаційної гармати, наведеної на рис. 3, ступінь перестиснення $\alpha = 1,043$. При використанні горючої суміші з молярним співвідношенням компонентів (кисню до пропану), що дорівнює 4,2, і яка містить 5 % азоту, параметри детонації ЧЖ будуть приблизно наступними: $D_{CJ} = 2400$ м/с, $p_{CJ} = 34$ атм, $\rho_{CJ} = 2,59$ кг/м³, $u_{CJ} = 1100$ м/с. Тоді в даній установці згідно з залежностями [25] за рахунок перестиснення можна отримати наступні максимальні параметри: $p_* = 47$ атм, $\rho_* = 3,62$ кг/м³, $u_* = 1470$ м/с. При цьому динамічний напір продуктів перестисненої детонації $\rho_* u_*^2/2$ буде в 2,5 разів вищим, ніж детонації ЧЖ.

Оціночні розрахунки узгоджуються з чисельним моделюванням процесу детонації у розглянутій ДКЗ, проведеним з використанням програмного пакету ANSYS.

На рис. 4 показано розподіл тиску в часі на стінки ДКЗ і в стволі. У ДКЗ параметри детонації відповідають параметрам ЧЖ. У зоні звуження та на відстані приблизно двох калібрів безпосередньо в стволі знаходиться область перестисненої детонації, після якої детонація знову переходить у стаціонарну ЧЖ.

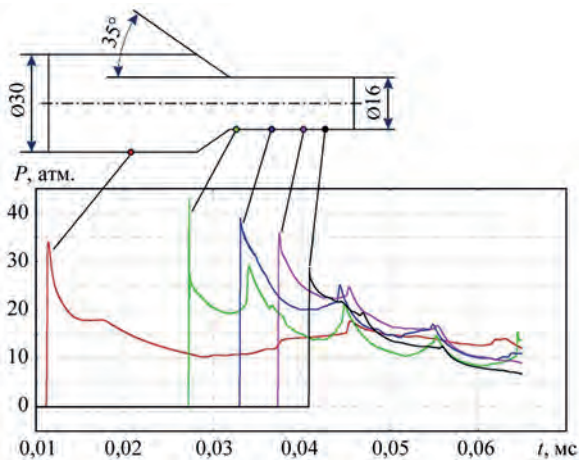


Рис. 4. Чисельне моделювання розподілу тиску в часі на стінки детонаційної камери згоряння та ствол на різній відстані від звуження

З метою забезпечення ефективного енергообміну та необхідних перетворень у вихідному порошковому матеріалі в детонаційних установках можна також використовувати багатосекційні камери. Тому на сьогоднішній день розвиток безклапанних ДГУ в ІЕЗ ім. Є.О. Патона акцентовано на проектуванні та дослідженні багатоканальних конструкцій. На даний час створено серію лабораторних багатоканальних установок для детонаційного наплення. У даному типі установок ДХ розвивається в циліндричних і кільцевих камерах згоряння, які охоплюють їх, що забезпечує багаторазове відбиття хвилі від стінок, зштовхування та об'єднання їх в єдиний струмінь продуктів згоряння. Як наслідок, істотною відмінністю даного типу установки є те, що в них здійснюється об'єднання енергії процесу детонації горючої суміші з декількох, спеціально профільованих детонаційних камер. Це забезпечує утворення струменя продуктів згоряння, який має високу швидкість і температуру, що дозволяє ефективно напилувати різні

порошкові матеріали, застосовуючи горючу суміш на основі вуглеводневого горючого газу.

На рис. 5 показано ескіз одного з дослідних зразків багатоканального детонаційного пристрою (БКДП). У БКДП для ініціації детонації конструкцію форкамери 1 залишили без зміни, як і в ДГУ, наведеному на рис. 3. У якості горючого газу можна використовувати пропан-бутан, пропілен, метан, етилен, пропілен і суміш пропілен-пропан-метилацетиленален (МАФ). Як окисник використовується кисень або суміш кисню з повітрям. Ступінь розведення горючої суміші повітрям залежить від властивостей порошку, що напилюється, і підбирається експериментально на основі багатфакторного планування експерименту.

Горючий газ подається через жиклер в форкамеру 1 аналогічної конструкції, як і у ДГУ, наведеному на рис. 3. На виході з форкамери розташовано свічку запалювання. Основна циліндрична детонаційна камера 2 заповнюється горючою сумішшю після заповнення форкамери. Навколо циліндричної ДКЗ розміщено кільцеву ДКЗ 3. Заповнення об'єму кільцевої камери здійснюється через змішувач 4. Подача компонентів горючої суміші в змішувач і їх перемішування організовано аналогічно, як і у форкамері. Порошок, що напилюється, подається в ствол ДУ радіально через циліндричну вставку 5 з рівномірно просвердленими по колу отворами. Як у газових, так і в порошковій магістралі відсутні електроклапани. Установка працює «квазінеперервно» з частотою 20 Гц і вище, що забезпечує можливість використання стандартних пристроїв і комплектуючих для подачі порошків і газів. Безперервна подача порошку та горючої суміші спрощує конструкцію і знижує вартість обладнання, підвищує надійність його роботи, а використання вуглеводневого палива (за

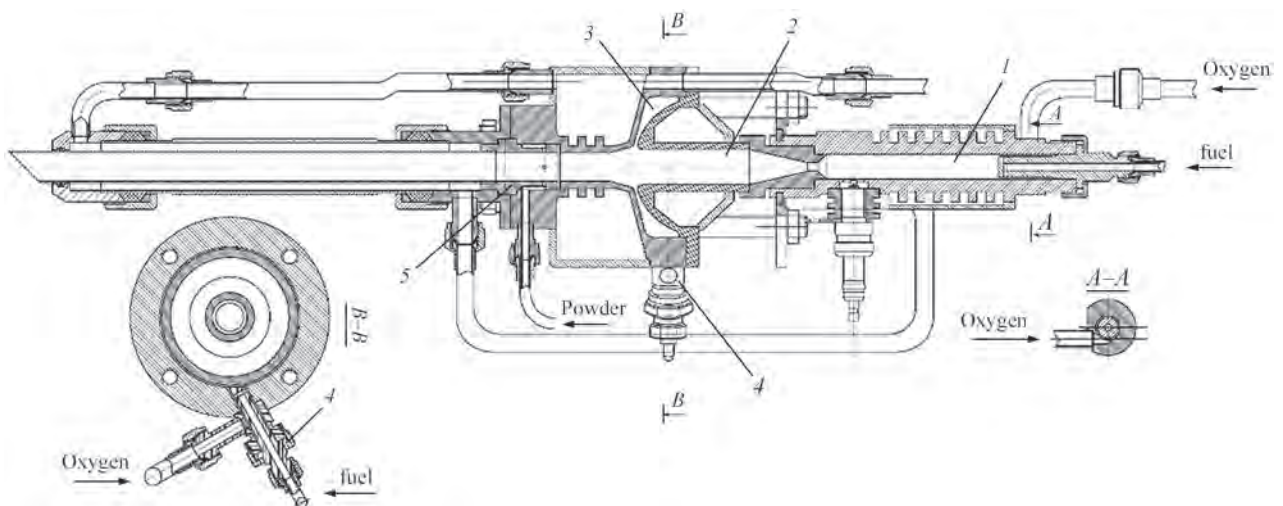


Рис. 5. Багатоканальний детонаційний пристрій

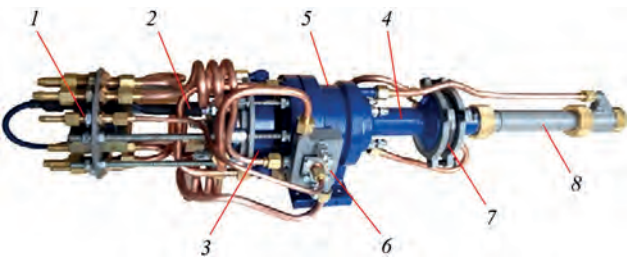


Рис. 6. Багатокамерний детонаційний пристрій для напилення покриттів: 1 – вузол подачі компонентів горючої суміші; 2 – свічка запалювання; 3 – форкамера; 4 – основна ДКЗ; 5 – кільцева ДКЗ суміші; 6 – газовий змішувач; 7 – вузол подачі порошку; 8 – ствол

винятком ацетилену) забезпечує безпеку та ефективність технології.

Витрата компонентів горючої суміші може варіюватися в межах, м³/год: 0,8...2,0 пропану, 5...10 кисню і 0...5 повітря. В основній циліндричній камері 2 відбувається розвиток детонаційного режиму згоряння. Кільцева камера 3 зі щільним виходом у циліндричний ствол використовується для стиснення продуктів згоряння та створення додаткового струменя, який «підпирає» в циліндричному стволі продукти детонації від основної камери. Для прискорення та нагрівання в ствол подається доза порошку. Ствол може мати внутрішній діаметр 16...20 мм, довжину 300...520 мм і вибирається в залежності від властивостей матеріалу порошку, що напилюється. Звуження робочого об'єму циліндричної камери діаметром 26 мм до діаметра ствола 16 мм забезпечує перестискання режиму детонаційного горіння. Подальше підтиснення продуктів згоряння відбувається за рахунок кільцевої камери. Газодинамічний процес ініціювання детонації в кільцевій камері забезпечує схлопування продуктів згоряння по осі ствола, що істотно підвищує їх швидкість, тиск і щільність. БКДП дозволяє розтягнути по довжині ствола продукти детонації і тим самим збільшити зону нагріву та прискорення, а отже, і час перебування в цій зоні порції порошку. Це позитивно позначається на коефіцієнті використання матеріалу.

Досвід створення промислових ділянок детонаційного газового напилення. Співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено кілька конструкцій БКДП

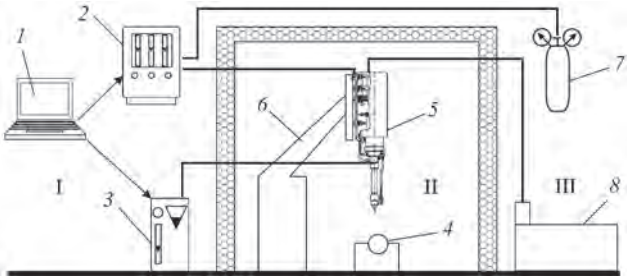


Рис. 7. Схема ділянки детонаційного напилення: 1 – система контролю і управління технологічним процесом; 2 – газовий пульт низького тиску для подачі кисню, пропану/бутану та повітря; 3 – порошковий живильник; 4 – напилюваний виріб; 5 – багатокамерна детонаційна установка; 6 – маніпулятор; 7 – газова рампа; 8 – дилер

Таблиця 2. Основні параметри БКДП

Параметр	Величина
Габарити (довжина ствола 300 мм), м	0,8×0,2×0,15
Вага, кг	15
Споживана потужність (система запалювання), Вт	<100
Загальний об'єм камер згоряння, см³	150
Діаметр ствола, мм	16...18
Частота генерації імпульсів, Гц	10...30
Система подачі порошку та горючої суміші	безклапанна
Тиск в газових магістралях, атм	1,2...3
Використовуване пальне	LPG, пропилен, МАФ, метан
Витрата LPG, м³/год	1...1,6
Витрата кисню, м³/год	5...8,5
Витрата повітря, м³/год	0,3...3,5
Витрата охолоджуючої рідини (вода), л/хв	7
Продуктивність, кг/год	
кераміка	0,5...1,0
металокераміка	1,0...2,0
метал	1,0...3,0
Коефіцієнт використання порошку, %	
кераміка	40...60
металокераміка	70...80
метал	70...90

для нанесення покриттів, найбільш вдалі з яких, крім науково-дослідних лабораторних експериментів, пройшли апробацію в промислових умовах. На рис. 6. представлено одну з модифікацій таких гармат.

Основні параметри БКДП наведено в табл. 2.

При організації промислових ділянок для БКДП застосовувалося в основному стандартне обладнання, яке широко використовується іншими методами газотермічного напилення. Що стосується безпосередньо собівартості самої детонаційної установки напилення, то, як правило, вона невисока через відносно низькі витрати на виготовлення та малу матеріаломісткість. Як наслідок, у загальних капітальних витратах на ділянку та її інфраструктуру собівартість детонаційної гармати становить мізерну частину. Тим самим, у техніко-економічному обґрунтуванні створення промислової ділянки основна увага приділялася рівню автоматизації обладнання та якості складових її комплектуючих.

Невеликі розміри напильовальної установки, низький тиск (до 0,3 МПа) у підвідних газових магістралях і безперервна подача компонентів горючої газової суміші та порошків забезпечують умову для технологічного маніпулювання при використанні



Рис. 8. Ділянка детонаційного напильнення покриттів

стандартних автоматизованих установок і роботів. При цьому можливо використовувати стандартні бокси та системи для нейтралізації шуму, а також апробовані в газотермічних технологіях напильнення порошкові живильники, газобалонні системи подачі газів, пульти управління та системи контролю за технологією напильнення та якістю покриття.

Ділянка детонаційного напильнення (рис. 7) складається з трьох частин:

I: Операторська для управління та контролю технологічним процесом.

II: Звукоізоляційний бокс, в якому знаходиться гармата на маніпуляторі та здійснюється безпосередньо нанесення покриттів.

III: Газовий відсік з розміщеними в ньому кисневою рампою, балонами азоту і пропан-бутану, а також компресором і блоком охолодження.

На базі компанії «Sputtek Advanced Coating Technologies» (GTA, Онтаріо, Канада) у 2016 р. було створено технологічну ділянку для детона-

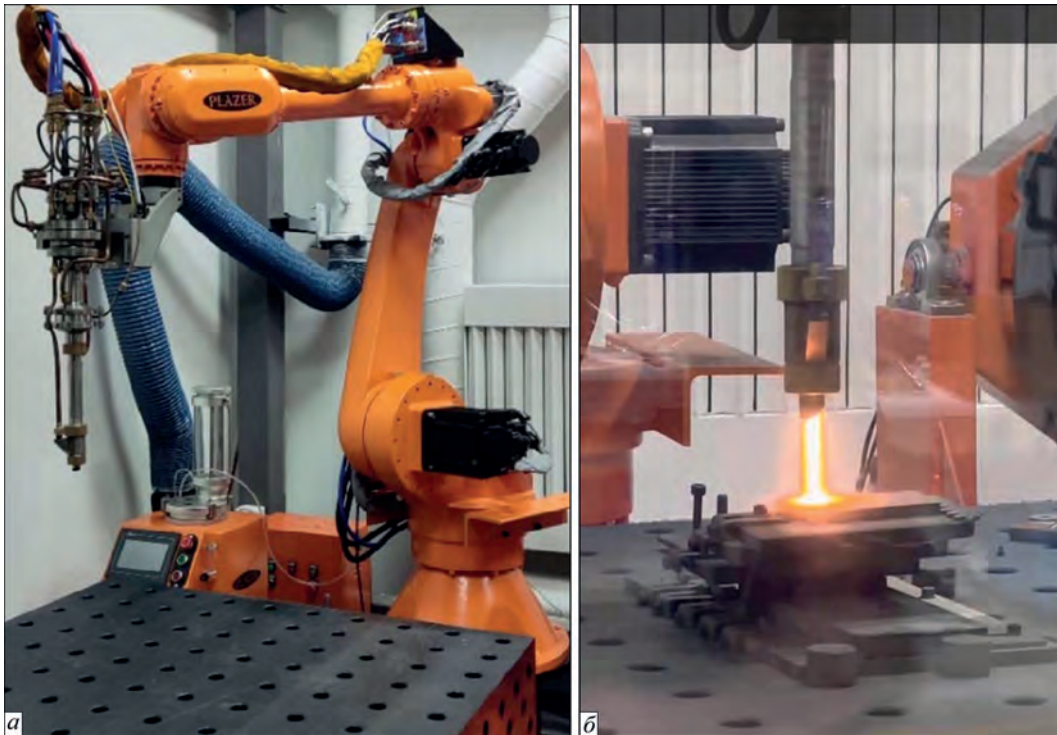


Рис. 9. Роботизоване обладнання (а) і процес (б) детонаційно-газового напильнення з реалізацією ефекту кумулювання енергії в БКДП, виготовлення якого організовано в ТОВ «Науково-виробничий центр ПЛАЗЕР» (м. Київ)



Рис. 10. Роботизована ділянка детонаційного газового напильнення з реалізацією ефекту акумулювання енергії в БКДП, з 6-осьовим роботом з максимальною довжиною переміщення руки 2238 мм і двоосьовим маніпулятором для обертання напильованих деталей

ційного напilenня металевих зносостійких покриттів на основі карбиду вольфраму на поверхні виробів. Його основу становить розміщене горизонтально на нерухомій станині БКДП і роботизований маніпулятор для переміщення виробів, що напilenюються, щодо сопла детонаційної установки. Програмований контролер дозволяє виконувати нанесення покриттів заданої товщини на деталях як плоскої, так і циліндричної форми. Невід'ємною частиною технологічного обладнання є звукоізолююче приміщення об'ємом 36 м³, що дозволяє знизити рівень шуму до 90 дБ і менше. З метою зниження запиленості в робочій зоні передбачено систему витяжної вентиляції з високою продуктивністю (до 200 і більше м³/хв.). На рис. 8 наведено звукоізоляційний бокс з пультом управління та консоллю оператора. Спостереження за процесом здійснюється дистанційно за допомогою телекамер. Система газопостачання газами такими як азот, пропан-бутанова суміш і кисень, містить необхідні регулятори тиску, запірну арматуру та набір вогнеперегороджувачів. Технологічна ділянка оснащена обладнанням для підготовки виробів до процесу напilenня, а також контролю якості (шорсткість поверхні, товщина покриття та його адгезія).

Важливим фактором розвитку технології у даний час є ступінь її автоматизації. Прикладом повної автоматизації процесу може служити роботизований комплекс з інтелектуальною системою управління (рис. 9) для детонаційно-газового напilenня з реалізацією ефекту кумулювання енергії в багатокамерній установці, виготовленій на виробничій базі ТОВ «Науково-виробничий центр ПЛАЗЕР» (м. Київ). Звукоізолюваний бокс (габарити 6540×6280×5200 мм) розроблено виходячи з вимог санітарних норм. Приміщення є вибухобезпечним, а його шумоізоляція дозволяє знизити рівень шуму в зоні роботи оператора до рівня ≤90 дБ. Для очищення повітря від продуктів згоряння, аерозолів і мікропорошків витяжна установка комплектується циклонним апаратом з продуктивністю не менше 9000 м³/год і механічним фільтром. Саму гармату розміщено на програмованому антропоморфному 6-осьовому роботі для переміщення установки за задалегідь заданою траєкторією або в ручному режимі за командами оператора з пульта дистанційного керування системи управління. За межами звукоізолюваного боксу знаходяться: модулі програмованої системи автоматизованого управління обладнанням і технологією (у тому числі: шафа газопідготовки і управління витратами газів; мобільний пульт системи управління з PLC контролером і монітором модуля

відеоспостереження; дисплей модуля дистанційного вимірювання температури деталі; контролер робота для напilenня); блок примусового автономного охолодження БКДП, інтегрований з системою автоматичного управління; балонна рампа. Щоб уникнути виникнення позаштатних ситуацій, особливу увагу приділено розробці системи безпеки. Приклад такої роботизованої ділянки, побудованої в Науково-дослідному Інституті зварювальних технологій імені Патона в провінції Чжецзян (КНР), наведено на рис. 10.

Застосування таких автоматизованих комплексів дозволяє в короткі терміни навчати операторів і впроваджувати технологію та обладнання на виробництві.

Висновки

У статті наведено інформацію щодо проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона робіт з розвитку технології детонаційно-газового напilenня. Традиційні ДГУ класу «Перун» та одержувані ними покриття детально вивчалися співробітниками інституту починаючи з 1980-х рр. Незважаючи на те, що ацетилен є найбільш вивченим паливом, зручним для детонаційного горіння, і ацетилено-кисневі вибухові суміші відрізняються найбільшою температурою та високим динамічним напором продуктів детонації, використання ацетилену вимагає дотримання підвищених заходів безпеки. Використання ж безпечнішої горючої суміші на основі метану, пропан-бутану або МАФу дозволило розробникам значно розширити можливості при конструюванні детонаційних гармат і розглянути можливість використання безклапанних систем, що працюють на підвищених частотах. Тим самим стало можливим підвищити надійність систем, ефективність і продуктивність процесу. Робота в імпульсному режимі розроблених співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона безклапанних ДГУ досягається за рахунок газодинамічних процесів у магістралях подачі пального і окисника. Цей принцип все частіше застосовується при конструюванні детонаційних гармат і в інших науково-дослідних організаціях.

У даний час активно вивчається питання можливості використання нестационарної перестисненої детонації для нанесення покриттів. Вирішення всіх цих питань проводилося співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона і при конструюванні БКДП. На відміну від традиційних детонаційних установок напilenня покриттів в БКДП використано перестиснений режим детонаційного згоряння горючих газових сумішей і безклапанна подача горючої суміші та порошку. Крім того, використання енергії кумуляції у спеціально профільованих камерах робить можливим створення багатофронтального потоку продуктів детонаційного згоряння, що забезпечує поси-

лений вплив на дисперсні частинки напилуваного матеріалу. Це істотно збільшує ефективність передачі енергії та забезпечує її економію. Згоряння горючих сумішей у спеціалізованих камерах надає широкі можливості управління швидкістю, температурою та складом продуктів згоряння, що дозволяє створити технологічні умови напылення, які реалізовані, наприклад, такими технологіями як Cold Spray, HVOF або HVOF. Висока частота ініціювання згоряння (20 Гц і вище) забезпечить квазінеперервний потік продуктів згоряння, що дозволяє використовувати дану технологію для нанесення покриттів на поверхні виробів нарівні з відомими HVOF, HVOF і Cold Spray процесами напылення. Технологія на основі БКДП має ряд переваг у порівнянні з високошвидкісними газотермічними методами, що широко використовуються. Високоякісні покриття отримуються при набагато менших матеріальних і енергетичних витратах, а легкий вибір параметрів напылення забезпечує широкий діапазон властивостей покриттів. Конструкція установки дозволяє працювати з високою ефективністю і надійністю на різних вуглеводневих сумішах в широкому діапазоні регулювання температури продуктів згоряння. Установка безпечно працює на різноманітному паливі, наприклад, пропан, пропан-бутан, пропілен, МАФ, природний газ. Для постачання газів використовується інфраструктура низького тиску. Автоматизована система управління (контролю) процесом і модульна концепція дозволяють легко інтегрувати технологію з уже наявною матеріально-технічною базою газотермічного напылення на підприємствах.

Концепція розвитку безклапанних, багатокамерних детонаційних гармат, що працюють на частотах 20 Гц і вище, має великі перспективи з точки зору підвищення ефективності самого методу нанесення покриттів. На даний момент в ІЕЗ ім. Є.О. Патона ведуться активні роботи з дослідження процесу та впровадження вже наявних конструкцій установок для практичного застосування в різних галузях промисловості.

Список літератури

1. Зельдович Я.Б. (1940) К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения. *ЖТФ*, **10**(17), 1453–1461.
2. Poorman, R.M., Sargent, H.B., Lamprey, H. (1955) *Method and apparatus utilizing detonation waves for spraying and other purposes*. Pat. No. US 2714563A. No. 275,332 declared: 07.03.1952; published: 08.02.1955.
3. Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. (1979) *Детонационное напыление покрытий*. Ленинград, Судостроение.
4. Бартеньев С.С., Федько Ю.П., Григорьев А.И. (1982) *Детонационные покрытия в машиностроении*. Ленинград, Машиностроение.
5. Шестерненко В.И. (1968) Детонационное нанесение покрытий. *Порошковая металлургия*, **1**, 37–46.
6. Самсонов Г.В., Шаривкер С.Ю. (1977) *Детонационные покрытия*. Энциклопедия неорганических материалов. Т. 1. Киев, Главная редакция УСЭ, 327–329.

7. Ющенко К.А., Астахов Е.А., Клименко В.С., Борисов Ю.С. (1990) Детонационное напыление упрочняющих покрытий и пути его развития. *Сб. трудов «Новые процессы и оборудование для газотермического и вакуумного покрытия»*, Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 26–32.
8. Астахов Е.А. (2005) *Научно-технологические основы управления свойствами детонационных покрытий*. Дис. д-ра техн. наук, 05.03.06, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина.
9. Борисов Ю.С., Астахов Е.А., Коржик В.Н. и др. (1993) Влияние состава детонирующей среды на формирование аморфно-кристаллических покрытий. *Автоматическая сварка*, **6**, 83–93.
10. Борисов Ю.С., Астахов Е.А., Мурашов А.П. и др. (2015) Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC–Co–Cr, полученных высокоскоростными методами напыления. *Автомат. сварка*, **10**, 26–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.04>
11. Астахов Е.А. (2003) Детонационный комплекс «Перун-С» для нанесения защитных покрытий. *Автомат. сварка*, **2**, 38–43.
12. Тюрин Ю.М., Колісниченко О.В. (2008) *Способ детонационного напыления покрытия и прилад для його здійснення*. Україна Пат. 83831.
13. Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д., Колісниченко О.В. (2009) Сравнительный анализ эффективности кумулятивно-детонационного и HVOF устройств для газотермического напыления покрытий. *Физическая инженерия поверхности*, **1-2**(7), 39–45. DOI: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/7948>
14. Колісниченко О.В., Тюрин Ю.Н., Товбин Р. (2017) Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства. *Автомат. сварка*, **10**, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.10.03>
15. Vasilik, N.J., Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. et al. (2013) Properties, peculiarities and applications of powder coatings formed by multi-chamber detonation sprayer. *Applied Mechanics and Materials*, **467**, 179–184. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.467.179>
16. Маркашова Л.И., Тюрин Ю.Н., Колісниченко О.В. и др. (2017) Влияние структуры на свойства покрытий из механических смесей порошков Al_2O_3 и Al (или Ti), полученных методом многокамерного детонационного напыления. *Автомат. сварка*, **9**, 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.09.05>
17. Колісниченко О.В., Тюрин Ю.М. (2023) Властивості покриттів, напылених багатокамерним детонаційним пристроєм та їх застосування. *Автомат. зварювання*, **9**, 39–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.09.07>
18. Fagoaga, I., Barykin, G., De Juan, J. et al. (1999) The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process. *Thermal Spray 1999: Proceedings from the United Thermal Spray Conference, Dusseldorf, Germany*, 282–287. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc1999p0282>
19. Parco, M., Barykin, G., Fagoaga, I., Vaquero, C. (2008) Development of wear resistant ceramic coatings by HFPD. *ITSC 2008: proceedings from the 2008 International Thermal Spray Conference, June 2–4, 2008, Maastricht, The Netherlands*, 130–134. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2008p0130>
20. Higuera, V., Belzunce, F. J., Riba, J. (2006) Influence of the thermal-spray procedure on the properties of a CoNiCrAlY coating. *Surface and Coatings Technology*, **200**(18-19), 5550–5556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.070>
21. Matsuoka, K., Muto, K., Kasahara, J. et al. (2016) Development of high-frequency pulse detonation combustor without purging material. *J. of propulsion and power*, **33**(1), 1–8. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.B36068>
22. Endo, T. (2020) Pulse-detonation thermal spray. *J. of the combustion society of Japan*, **62**(200), 103–115. DOI: https://doi.org/10.20619/jcombsj.62.200_103
23. Endo, T., Obayashi, R., Tajiri, T. et al. (2016). Thermal spray using a high-frequency pulse detonation combustor operated in the liquid-purge mode. *J. of Thermal Spray Technology*, **25**, 494–508. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0354-8>
24. Николаев, Ю.А., Топчий, М.Е. (1977). Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах. *Физика горения и взрыва*, **13**(3), 393–404.

25. Прохоров, Е.С. (2011). Приближенный расчет пересжатой газовой детонации в сужающихся каналах. *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика*, **6**(2), 5–9. DOI: <https://doi.org/10.54362/1818-7919-2011-6-2-5-9>

References

- Zeldovich, Ya.B. (1940) On the issue of energy use of detonation combustion. *Technical Physics*, **10**(17), 1453–1461 [in Russian].
- Poorman, R.M., Sargent, H.B., Lamprey, H. (1955) Pat. No. US 2714563A. *Method and apparatus utilizing detonation waves for spraying and other purposes*. No. 275,332 declared: 07.03.1952; published: 08.02.1955.
- Zverev, A.I., Sharivker, S.Yu., Astakhov, E.A. (1979) *Detonation spraying of coatings*. Leningrad, Shipbuilding [in Russian].
- Bartenev, S.S., Fedko, Yu.P., Grigoriev, A.I. (1982) *Detonation coatings in mechanical engineering*. Leningrad, Mechanical Engineering [in Russian].
- Shesternikov, V.I. (1968) Detonation coating. *Powder metallurgy*, **1**, 37–46 [in Russian].
- Samsonov, G.V., Sharivker, S.Yu. (1977) *Detonation coatings*. *Encyclopedia of Inorganic Materials*. Vol. 1. Kyiv, Main Edition of the Ukrainian Soviet Encyclopedia, 327–329 [in Russian].
- Yushchenko, K.A., Astakhov, E.A., Klimenko, V.S., Borisov, Yu.S. (1990) *Detonation spraying of hardening coatings and ways of its development*. Collected papers «New processes and equipment for gas-thermal and vacuum coating», Kyiv, Paton Electric Welding Institute, 26–32 [in Russian].
- Astakhov, E.A. (2005) *Scientific and technological basis for controlling the properties of detonation coatings*. Thesis. Dr. Tech. sciences, 05.03.06, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine [in Russian].
- Borisov, Yu.S., Astakhov, E.A., Korzhyk, V.N. et. al. (1993) Influence of the composition of the detonating medium on the formation of amorphous-crystalline coatings. *Automat. Svarka*, **6**, 83–93 [in Russian].
- Borisov, Yu.S., Astakhov, E.A., Murashov, A.P. et. al. (2015) Investigation of structure and properties of thermal coatings of WC-Co-Cr system produced by high-velocity methods of spraying. *The Paton Welding J.*, **10**, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.04>
- Astakhov, E.A. (2003) Detonation system «Perun-S» for deposition of protective coatings. *The Paton Welding J.*, **2**, 36–40.
- Tyurin, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. (2008) *Method of detonation spraying of coatings and device for its realization*. pat. 8383, Ukraine.
- Tyurin, Yu. N., Pogrebnyak, O.D., Kolisnichenko, O.V. (2009) Comparative analysis of an efficiency of cumulative-detonation and HVOF devices, which are applied for gas-thermal deposition of coatings. *Physical surface engineering*, 1-2(7), 39–45 [in Russian]. DOI: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/7948>
- Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.N., Tovbin R. (2017) Efficiency of process of coating spraying using multichamber detonation unit. *The Paton Welding J.*, **10**, 18–23 DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.10.03>
- Vasilik, N. J., Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. et. al. (2013) Properties, peculiarities and applications of powder coatings formed by multi-chamber detonation sprayer. *Applied Mechanics and Materials*, **467**, 179–184. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.467.179>
- Markashova, L.I., Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. et al. (2017) Effect of structure on properties of Al₂O₃ and Al (or Ti) mechanical mixture coatings produced by multichamber detonation spraying method. *The Paton Welding J.*, **9**, 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.09.05>
- Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.M. (2023) Properties of WC-Co-Cr coatings, deposited by multichamber detonation device and their application. *The Paton Welding J.*, **9**, 47–52. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.09.08>
- Fagoaga, I., Barykin, G., De Juan, J., Soroa, T., Vaquero, C. (1999) The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process. Thermal Spray 1999. In: *Proc. of the United Thermal Spray Conf., Dusseldorf, Germany*, 282–287. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc1999p0282>
- Parco, M., Barykin, G., Fagoaga, I., Vaquero, C. (2008). Development of wear resistant ceramic coatings by HFPD. ITSC 2008. In: *Proc. of the 2008 Int. Thermal Spray Conf. (June 2–4, 2008, Maastricht, The Netherlands)*, 130–134. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2008p0130>
- Higuera, V., Belzunce, F. J., & Riba, J. (2006). Influence of the thermal-spray procedure on the properties of a CoNiCrAlY coating. *Surf. and Coat. Technol.*, **200**(18-19), 5550–5556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.070>
- Matsuoka, K., Muto, K., Kasahara, J., Watanabe, H., Matsuo, A., Endo, T. (2016) Development of high-frequency pulse detonation combustor without purging material. *J. of Propulsion and Power*, **33**(1), 1–8. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.B36068>
- Endo, T. (2020) Pulse-detonation thermal spray. *J. of the Combustion Society of Japan*, **62**(200), 103–115. DOI: https://doi.org/10.20619/jcombsj.62.200_103
- Endo, T., Obayashi, R., Tajiri, T. et. al. (2016) Thermal spray using a high-frequency pulse detonation combustor operated in the liquid-purge mode. *J. of Thermal Spray Technology*, **25**, 494–508. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0354-8>
- Nikolaev, Yu.A., Topchiyan, M.E. (1977) Calculation of equilibrium flows in detonation waves in gases. *Fizika Goreniya i Vzryva*, **13**(3), 393–404 [in Russian].
- Prokhorov, E.S. (2011) Approximate calculation of overdriven gaseous detonation in convergent channels. *Vestnik NSU. Series: Physics*, **6**(2), 5–9 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.54362/1818-7919-2011-6-2-5-9>

DEVELOPMENT OF DETONATION GAS SPRAYING TECHNOLOGY OF COATINGS IN THE E.O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE OF THE NASU (Overview)

O.V. Kolisnichenko¹, V.M. Korzyk¹, P.D. Stukhlyak³, A.I. Kildiy¹, R. Tovbin², M. Shinlov², V. Mudrichenko³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: vnkorzyk@gmail.com

²Sputtek Inc. 110 Share Road, Vaughan, Ontario, Canada, L4L 8P4. E-mail: mshynlov@gmail.com

³Paton Research Institute of Welding Technologies in Zhejiang Province: PRC, Zhejiang Province, Hangzhou City, Xiaoshan District, St. Shixing Beilu 857, office. 426. E-mail: vladyslav.mudrichenko@ukr.net

Despite the fact that the detonation-gas spraying method is a high-tech process that allows high-quality coatings deposition on products, it has some disadvantages that may limit its widespread use in industry, compared to other thermal coating methods. Such disadvantages include increased safety requirements, low productivity and reliability of structures. However, the use of the latest component base, accumulated technological experience, modern research in the field of detonation processes, and new approaches to the design of detonation units allow us to hope that the detonation-gas method will become widespread along with such methods as Plasma or High Velocity Oxygen Fuel spraying. The paper shows the leading role of Ukrainian scientists and engineers in the development and implementation of detonation-gas spraying of coatings. Particular attention is paid to the work carried out at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. The concepts and development stages of designs from classic detonation guns to valveless multi-chamber guns operating at high frequencies, are shown. Automated industrial complexes have been created on their base with application of modern components and equipment that allow effective use of the advantages of detonation-gas spraying. 23 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

Keywords: detonation, coatings, detonation-gas unit, valveless design, combustion chamber, industrial plot

Отримано 08.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 10.05.2024

Прийнято 10.07.2024

ВПЛИВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ЛАЗЕРА НА ПРОЦЕС ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 1561

Y. Zhao, X. Wang, Z. Liu, V. Khaskin

Ключова лабораторія передових технологій зварювання провінції Гуандун, Китайсько-український інститут зварювання, Академія наук Гуандуну, Гуанчжоу, 510650, Китай. E-mail: 13826482032@163.com

Проаналізовано результати зварювання алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 6 мм імпульсною дугою з плавким електродом (P-MIG) із додаванням сфокусованого випромінювання Nd:YAG-лазера і без нього. При лазер-P-MIG зварюванні вплив дугового джерела енергії сприяє покращенню поглинання лазерного випромінювання і якісному формуванню підсилення шва, а вплив лазерного джерела призводить до збільшення глибини проплавлення за рахунок утворення пароголового каналу (keyhole) і до зменшення густини струму анодної області дуги на електродному дроті, що зменшує викиди зварювальних аерозолів. Визначено фактори впливу на ефективність дії лазерного випромінювання при лазер-P-MIG зварюванні. Показано, що підвищення потужності лазерного випромінювання призводить до зростання напруги на дузі із одночасним зменшенням зварювального струму. Формування якісних швів P-MIG зварюванням сплаву 1561 потребує погонної енергії 4,5...5,0 кДж/см, при цьому утворюється регулярна структура металу швів із дендритним параметром 13...15 мкм і міцністю з'єднань 90...92 % міцності основного металу. Введення в процес зварювання сфокусованого випромінювання Nd:YAG-лазера потужністю 3,0 кВт дозволяє приблизно вдвічі зменшити погонну енергію, за рахунок чого дендритний параметр зменшується до 10 мкм, а міцність з'єднань збільшується до 93...96 % міцності основного металу. Бібліогр. 17, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, імпульсне зварювання дугою з плавким електродом (P-MIG), випромінювання Nd:YAG-лазера, режими, зварювальні аерозолі, структури, міцність

Вступ. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Питання зварювання конструкцій з алюмінієвих сплавів стає все більш актуальним у зв'язку із збільшенням попиту на полегшені транспортні та технічні засоби, прилади тощо [1]. Цьому ж сприяє застосування широкої номенклатури будівельних конструкцій з алюмінієвих сплавів [2]. Зокрема, інтерес дослідників викликає застосування в якості будівельних та конструкційних матеріалів алюмінієвих сплавів четвертої, п'ятої і шостої серій [3]. Ці сплави приваблюють не лише такими характеристиками, як зносо- і корозійна стійкість, сполучення низької густини із прийнятною міцністю, а й достатньо доброю зварюваністю [4]. Технології зварювання конструкцій з таких матеріалів відпрацьовуються вже досить давно [5]. Але з виникненням сучасних способів зварювання, зокрема лазерно-дугових і лазерно-плазмових [6], постає питання щодо підвищення ефективності процесів з'єднання вже добре відомих матеріалів.

Застосування лазер-MIG процесу може бути більш вигідним для зварювання алюмінієвих сплавів, ніж використання процесів лазер-TIG або лазер-плазма, через більшу технологічність введення додаткового матеріалу при формуванні шву і простішу спроможність керувати його структуроутворенням. Однак, процес лазер-MIG

зварювання має свої особливості. Так, при даному способі зварювання сплаву 5083 товщиною 5 мм із застосуванням випромінювання волоконного лазера було виявлено схильність до утворення крупної пористості у швах [7]. Це було пов'язано із порушенням стабільності пароголового каналу (keyhole). Усунути цей недолік може допомогти перехід до теплопровіднісного режиму зварювання, який виключає утворення пароголового каналу (keyhole) [8]. Але це знижує ефективність застосування лазерного випромінювання. Ще одним варіантом покращення якості лазер-MIG зварювання сплаву 5083 може бути процес двостороннього зварювання, який більш підходить для з'єднання товщин понад 10 мм [9].

Таким чином, постає актуальна задача дослідження особливостей процесу зварювання відомих конструкційних алюмінієвих сплавів, зокрема п'ятої серії, із застосуванням дуги з плавким електродом і лазерного випромінювання. При цьому важливо розглянути фактори підвищення ефективності застосування випромінювання із довжиною хвилі порядку 1,06 мкм. В якості досліджуваного сплаву можна розглянути сплав 5083 або близький до нього 1561 товщиною до 10 мм [10].

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – проаналізувати можливості підвищення ефек-

Y. Zhao – <https://orcid.org/0000-0001-9471-4490>, X. Wang – <https://orcid.org/0009-0003-3423-2547>,

Z. Liu – <https://orcid.org/0000-0002-0074-9666>, V. Khaskin – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>

© Y. Zhao, X. Wang, Z. Liu, V. Khaskin, 2024

тивності процесу і зменшення питомого енерговкладання в метал при зварюванні алюмінієвого сплаву 1561 імпульсною дугою з плавким електродом (P-MIG) за рахунок залучення до процесу лазерного випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону спектру.

Для досягнення цієї мети пропонується розв’язання наступних завдань:

- 1. Проаналізувати взаємодію дугового і лазерного джерел енергії в процесі зварювання сплаву 1561 та вплив лазерного випромінювання на особливості P-MIG зварювання.
- 2. Проаналізувати вплив зміни потужності лазерного випромінювання на формування швів, зміну площі поперечного перерізу швів та інші параметри процесу P-MIG зварювання сплаву 1561.
- 3. Порівняти отримані результати P-MIG зварювання сплаву 1561 без застосування лазерного випромінювання і з його застосуванням.

Матеріали, обладнання та методи дослідження. Для вирішення поставленої мети роботи обрали наступну методику виконання досліджень: вибір параметрів режиму P-MIG зварювання алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 6 мм за критерієм задовільного формування зварного шву, дослідження впливу додавання сфокусованого лазерного випромінювання (довжина хвилі $\lambda = 1,06$ мкм) на процес P-MIG зварювання, порівняння проплавлення пластин сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) P-MIG зварюванням без і з додаванням лазерного випромінювання, вибір параметрів режиму лазер-P-MIG зварювання сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) за критерієм задовільного формування зварного шва, аналіз отриманих результатів за макрошліфами поперечних перетинів швів, визначення перспективності застосування сфокусованого лазерного випромінювання ($\lambda = 1,06$ мкм) спільно із імпульсною ду-

гою з плавким електродом при зварюванні сплавів системи Al-Mg.

Для проведення експериментів в роботі використовували зразки алюмінієвого сплаву 1561 розміром $300 \times 100 \times 6$ мм. Хімічний склад сплаву 1561 наведено у табл.1. В якості плавкого електроду використовували дріт діаметром 1,2 мм з того ж сплаву.

Експерименти проводилися за схемою, запропонованою в роботі [11]. Згідно даній схемі було зібрано лабораторний стенд на базі трикоординатного маніпулятора, за допомогою якого проводили P-MIG і лазер-P-MIG зварювання (рис. 1). Для цього застосували оригінальну зварювальну головку, що інтегрувала лазерну і дугову складові. При проведенні досліджень з P-MIG зварювання дуговий пальник встановлювали сторч зразка, а у дослідженнях із лазер-P-MIG зварювання сторч зразка було розташовано вісь сфокусованого лазерного променя, а дуговий пальник знаходився спереду по ходу зварювання під певним кутом (рис. 1, а). В якості захисного газу використовували аргон із витратами 12...20 л/хв. Випромінювання потужністю до 4,0 кВт підводили від Nd:YAG-лазера за допомогою оптичного волокна діаметром 400 мкм (діаметр плями фокусування до 0,5 мм). У якості джерела живлення P-MIG процесу використовували «Fronius TPS-2700» зі струмом зворотної полярності частотою порядку 300 Гц.

Зварювання зразків виконували без розробки крайок. Кут нахилу осі сфокусованого лазерного випромінювання до зварюваного металу складав 81° , а кут нахилу дугового пальника – 55° . Корінь шва формували на змінній підкладці з нержавіючої сталі із формуючою канавкою глибиною 1,5...2,1 мм.

Після зварювання виконували поперечні перетини зразків, з яких далі виготовляли макрош-

Таблиця 1. Хімічний склад сплаву 1561, мас. %

Al	Mn	Si	Fe	Cu	Zn	Zr	Mg	Be
Основа	0,8...1,1	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	0,02...0,12	5,5...6,5	0,0001...0,0003

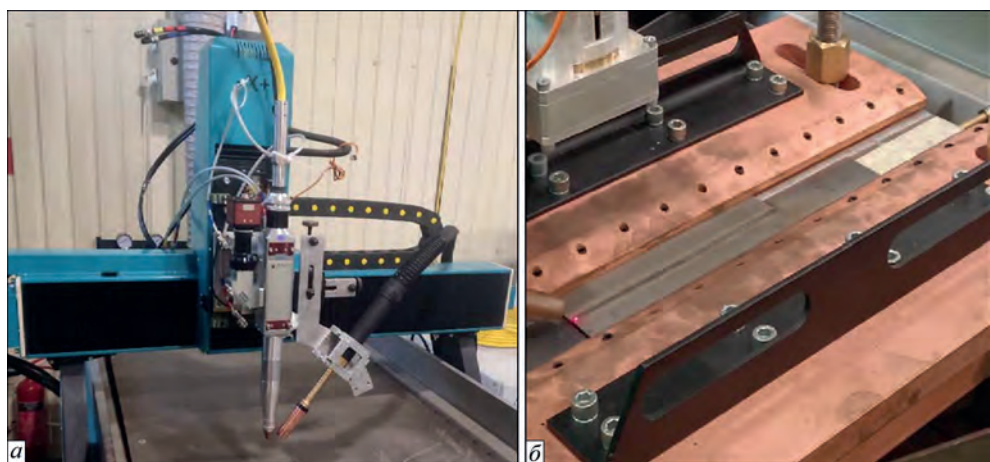


Рис. 1. Стенд (а) для проведення експериментів із лазер-P-MIG зварювання і струбцина (б) із зразком після зварювання

ліфи. Геометричні параметри швів (ширину B , висоту підсилення a , глибину проплавлення h , площу поперечного перерізу S) визначали на цих макрошліфах з точністю $\pm 0,1$ мм. Оцінювали також кількість та діаметр пор і порожнин у швах. При виготовленні макрошліфів структуру швів виявляли шляхом хімічного травлення у розчині, який складався з трьох кислот – $\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{HF}$ у співвідношенні 18:4:1. Мікроструктури швів виявляли згідно рекомендаціям роботи [12]. Одержані структури досліджували за допомогою мікроскопу «Neophot-32» при збільшеннях $\times 50 \dots \times 1000$. Механічні випробування на статичне одновісне розтягнення проводили згідно вимог ГОСТ 6996-66 із застосуванням універсального сервогідравлічного випробувального комплексу MTS 318.25 (США, Material Test System) з максимальним зусиллям 250 кН.

Результати дослідження зварювання алюмінієвих сплавів. Дослідження проводили шляхом зварювання встик без розробки крайок зразків алюмінієвого сплаву 1561 обраного розміру. При цьому обрали наступні діапазони варіювання параметрів режимів зварювання:

– P-MIG зварювання – струм зварювання $I = 100 \dots 200$ А, напруга на дузі $U = 16 \dots 24$ В, швидкість процесу $V = 0,42; 0,5; 0,75; 1,0$ м/хв, швидкість подачі присаджувального дроту $V_{\text{др}} = 4 \dots 12$ м/хв;

– лазер-P-MIG зварювання – потужність випромінювання $P = 1, 2, 3, 4$ кВт, швидкість процесу $V = 0,5; 0,75; 1,0$ м/хв, діапазони інших параметрів режиму аналогічні P-MIG зварюванню.

Значення погонних енергій процесів одностороннього зварювання металу підраховували по формулах:

– P-MIG зварювання $E_{\text{MIG}} = 0,72IU / V$, кДж/см; де 0,72 – ефективний ККД дуги з плавким електродом в аргоні [13, 14];

– лазерного зварювання $E_{\text{las}} = 0,75P / V$, кДж/см; де 0,75 – ефективний ККД зварювання Nd:YAG-лазером [15];

– лазер-P-MIG зварювання $E_{\Sigma} = E_{\text{las}} + E_{\text{MIG}}$

Спочатку за критерієм якості формування шву було підібрано режим P-MIG зварювання (рис. 2, а). Після цього аналогічним чином було підібрано режим лазер-P-MIG зварювання (рис. 2, б). Порівняння цих швів показало, що у разі застосування лазер-P-MIG зварювання шов звужується у $\sim 1,7$ разів. Подальші дослідження показали, що шви звужуються в середньому у 1,5...2,0 рази. При цьому погонна енергія зварювання зменшується приблизно у 2 рази порівняно із P-MIG зварюванням, а швидкість зварювання – збільшується понад 2 рази. Такий результат свідчить про перспективність заміни P-MIG зварювання лазер-P-MIG зварюванням і необхідність більш детально порівняти ці процеси.

Спроба виконати лазерне зварювання сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) показала проблеми із досягненням повного проплавлення, пов'язані із недостатньою густиною потужності використаного Nd:YAG-лазера, випромінювання якого фокусувалося у пляму діаметром близько 0,5 мм. Крім того, була встановлена необхідність використання присаджувального матеріалу для усунення провисання шва і формування верхнього підсилення (рис. 3).

Встановлено, що в умовах P-MIG процесу в діапазоні швидкостей зварювання 0,5...0,75 м/год та подачі електродного дроту 7,5...9,3 м/хв не вдається повністю проплавити сплав 1561 товщиною 6 мм. У той самий час при тих же режимах гібридний процес лазер-P-MIG зварювання дозволяє отримати повне проплавлення зварювального металу за рахунок наявності сфокусованого лазерного випромінювання потужністю 4 кВт (табл.2).

Проте, крім очевидного впливу лазерного випромінювання на глибину проплавлення і формування шва при проведенні технологічних досліджень було встановлено його вплив на напругу на дузі та зварювальний струм. Встановлено, що незалежно від швидкості подачі дроту (у діапазоні від 7,5 до 13,2 м/хв) лазерне випромінювання потужністю 4 кВт збільшує на 1...2 В напругу на дузі (і, відповідно, довжину дуги) та зменшує на 10...15 А зварювальний струм (рис. 4). Зі збіль-

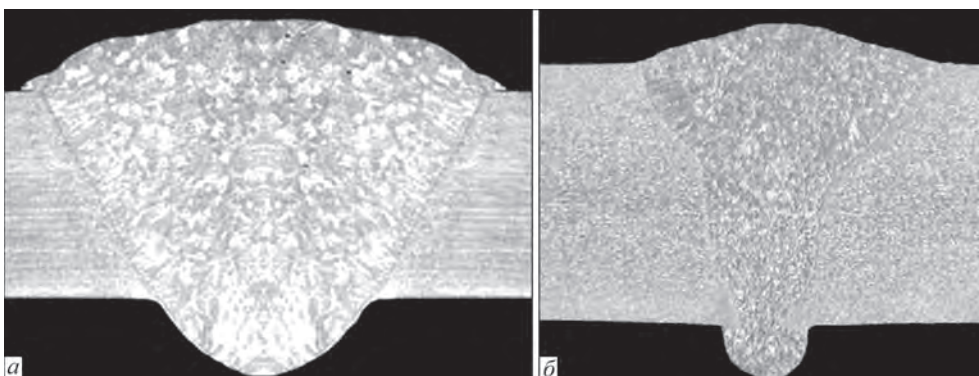


Рис. 2. Макроструктура швів отриманих різними способами зварювання сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм): а – P-MIG ($I \approx 200$ А; $U = 22,5$ В; $V = 0,42$ м/хв; $E_{\text{MIG}} \approx 4,8$ кДж/см); б – лазер-P-MIG зварювання ($P = 3,0$ кВт; $I = 75$ А; $U = 17$ В; $V = 1,0$ м/хв; $E_{\Sigma} = 2,4$ кДж/см)

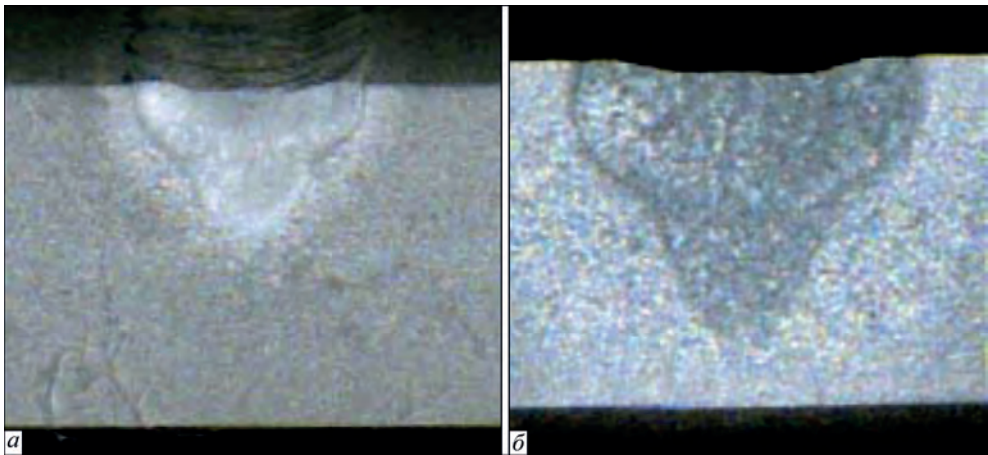


Рис. 3. Макроструктура наплавочних швів, отриманих лазерним зварюванням сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм): *a* – $P = 3,0$ кВт; $V = 0,6$ м/хв; $E_{\text{las}} \approx 2,3$ кДж/см; *б* – $P = 4,0$ кВт; $V = 0,5$ м/хв; $E_{\text{las}} \approx 3,6$ кДж/см

Таблиця 2. Геометрична форма наплавочних швів у сплаві 1561 ($\delta = 6$ мм) в залежності від швидкості зварювання та подачі електронного дроту у Р-MIG та лазер-Р-MIG процесах

Режими зварювання		Р-MIG зварювання	Лазер-Р-MIG зварювання ($P = 4$ кВт)
Швидкість зварювання, м/хв	Швидкість подачі дроту, м/хв		
0,5	7,5		
	8,3		
0,75	8,3		
	9,3		
1,0	10,9		
	12,2		

шенням потужності лазерного випромінювання від 1 до 4 кВт при незмінній подачі електродного дроту також спостерігається залежність збільшення напруги на дузі та зменшення зварювального

струму (табл. 3). При цьому водночас спостерігається збільшення сумарного показника $h + a$ (глибини проплавлення h і висоти підсилення шва a) і

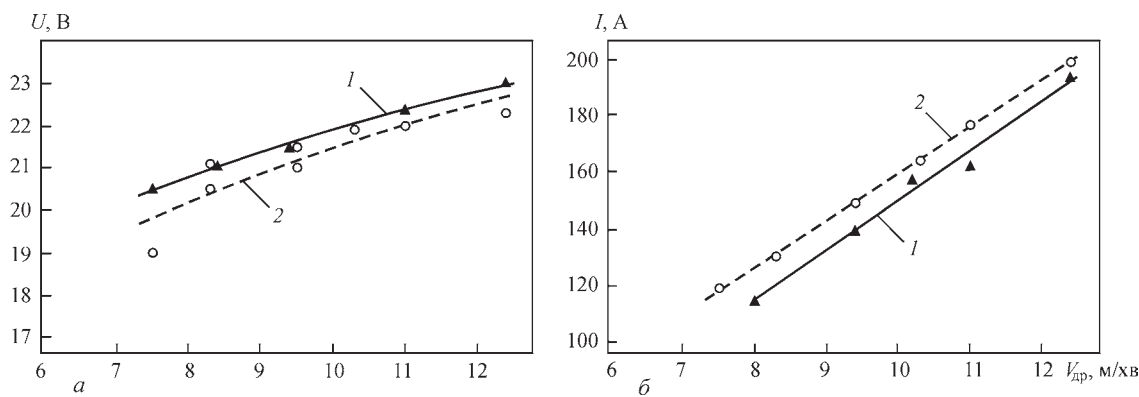


Рис. 4. Залежності зміни напруги на дузі U , В і зварювального струму I , А від швидкості $V_{др}$, м/хв подачі електродного дроту при лазер-Р-MIG (1) зварюванні із 4 кВт лазерного випромінювання і Р-MIG зварюванні (2)

ширини шва B при лазер-Р-MIG зварюванні порівняно із Р-MIG зварюванням (рис. 5).

Проведені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона попередні дослідження показали [16], що з підвищенням струму при зварюванні плавким електродом в інертних газах середня температура крапель електродного металу підвищується, досягаючи значень темпера-

тури кипіння алюмінієвого сплаву з якого виготовлено дріт. При цьому відбувається випаровування металів із порівняно низькою температурою пароутворення – таких як магній, літій, цинк тощо. Зниження вмісту магнію в металі шва на один відсоток призводить до зменшення міцності з’єднання на 10...20 МПа. Проведені дослідження пока-

Таблиця 3. Макроструктури наплавочних швів, отриманих при Р-MIG і лазер-Р-MIG зварюванні алюмінієвого сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) ($V = 0,5$ м/хв; $V_{др} = 8,3$ м/хв)

Зварювальний струм I , А	Напруга на дузі U , В	Потужність випромінювання P , кВт	Результат
135	18,7	0	
135	18,7	1	
126	18,6	2	
130	20,0	3	
128	20,5	4	

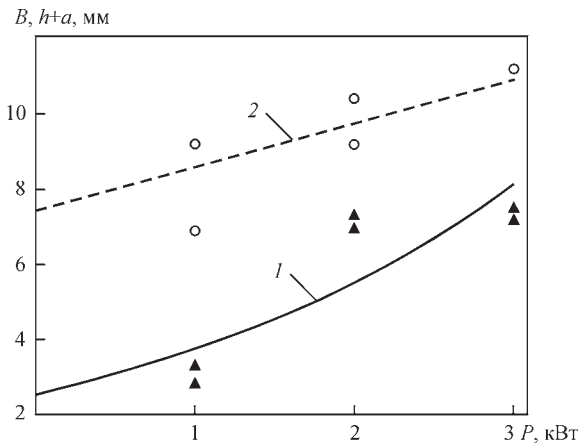


Рис. 5. Вплив зміни лазерної потужності P , кВт при лазер-Р-MIG зварюванні ($V = 0,5$ м/хв; $V_{др} = 8,3$ м/хв) сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) на збільшення сумарного показника глибини проплавлення h із висотою підсилення шва a (1) і ширини шва B (2)

зали, що при Р-MIG зварюванні у дослідженому діапазоні струмів вміст магнію в металі швів може знижуватися до 25 % відносно даних табл. 1, а у разі лазер-Р-MIG зварювання – до 15 %. Вірогідно, це пов'язано із значним (до 3 разів) зменшенням об'єму зварювальної ванни.

Висока середня температура крапель електродного металу при зварюванні плавким електродом марки 1561 (незалежно від складу захисного газу) призводить до випаровування легуючих елементів та забруднення робочої зони зварювальними аерозолями складного хімічного складу, які вміщують ряд токсичних компонентів твердої фази – Al_2O_3 , MgO та MnO_2 . Визначення кількості аерозолів виконувалося по наступній методиці. Повітря із зони зварювання на відстані 20 см від дуги відбирали електроаспіратором моделі 822 зі швидкістю 12...15 л/хв через попередньо зважені фільтри АФА-ВП-20. Кількість твердих аерозолів в повітрі робочої зони вимірювали гравіметричним методом. Вміст Al_2O_3 , MgO та MnO_2 встановлювали за методикою, описаною в роботі [17].

Загальна кількість аерозолів при Р-MIG зварюванні, в першу чергу, залежить від густини зварювального струму на електродному дроті. Чим більша густина струму, тим більше аерозолів утворюється навколо зварювальної ванни. У досліджуваному діапазоні режимів густина струму становила 50...90 А/мм², при цьому концентрації відповідних зварювальних аерозолів становили: $K_{Al_2O_3} = 125...145$ мг/м³, $K_{MgO} = 14...17$ мг/м³, $K_{MnO_2} = 1,9...2,2$ мг/м³. При лазер-Р-MIG зварюванні зміни концентрації зазначених зварювальних аерозолів встановлено не було.

При гібридному лазер-Р-MIG процесі дуже добре спостерігається прояв свічення сфокусованого лазерного випромінювання у середовищі концентрованих аерозолів навколо області дії зварювальної дуги. З підвищенням швидкості плавлення дро-

ту (зварювального струму) збільшується кількість крапель електродного металу та об'єму продуктів, які випаровуються з них. Це підвищує густину газового середовища у прикатодній області. Крім того, зварювальна ванна на алюмінієвих сплавах має вигляд своєрідного дзеркала, яке збільшується у розмірах з підвищенням зварювального струму. Це викликає збільшення втрат лазерного випромінювання у неоднорідному крапельно-аерозольному середовищі навколо ванни та підвищення його віддзеркалювання від самої ванни. В результаті знижується частка поглинутого лазерного випромінювання і ефективна лазерна потужність, що діє безпосередньо на зварюваний метал, тобто знижується ККД лазерної складової процесу лазер-Р-MIG зварювання. Відповідно, результатом є зменшення глибини проплавлення і зміна геометричних параметрів сформованих швів.

Дослідження впливу швидкості подачі електродного дроту на геометричні параметри наплавочних швів при Р-MIG та лазер-Р-MIG зварюванні показали наступне. При одних і тих же швидкостях зварювання ($V = 0,5$ м/хв) і подачі дроту ($V_{др} = 7,5...9,3$ м/хв) гібридний лазер-Р-MIG процес дозволяє порівняно з Р-MIG підвищити на 50...60 % ширину швів при одночасному зменшенні висоти підсилення на 10...60 % (відповідно збільшенню величини $V_{др}$). Аналогічні залежності спостерігаються й при більших швидкостях зварювання, але при менших абсолютних значеннях геометричних параметрів швів.

Як показали проведені дослідження, введення лазерного випромінювання потужністю P у Р-MIG процес призводить до збільшення глибини проплавлення (рис. 5). Однак, порівняння погонних енергій Р-MIG і лазер-Р-MIG зварювання показує, що процес збільшення глибини проплавлення (точніше сумарного показника $h + a$) є неперервним і має спільну тенденцію (рис. 6). Згідно цієї тенденції збільшення показника $h + a$ є прямо пропорційним вкладеній погонній енергії зварювання. Натомість, зміна ширини швів і площі їх перерізу залежить від наявності лазерного випромінювання. Так, при лазер-Р-MIG зварюванні із однаковою погонною енергією ширина швів зменшується на 30...40 % порівняно із шириною швів при Р-MIG зварюванні (рис. 6), що пояснює зменшення приблизно втричі площі переплавленого металу при цьому (рис. 7, а). Водночас, зростання площі переплавленого металу зі збільшенням лазерної потужності P при лазер-Р-MIG зварюванні (рис. 7, б) свідчить про збільшення глибини проплавлення за рахунок дії випромінювання.

Що стосується характерних дефектів швів у вигляді внутрішніх пор та порожнин, то їх кількість і розміри неважко зменшити до прийнятного рівня у

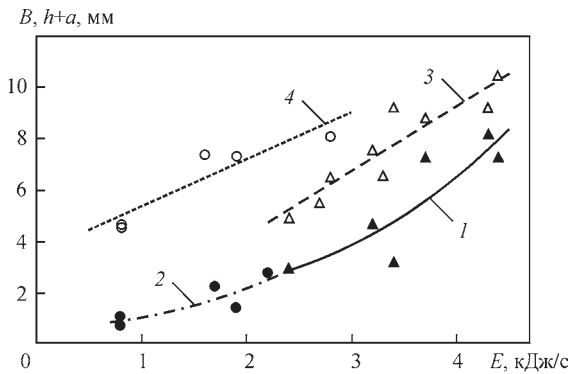


Рис. 6. Вплив погонної енергії E , кДж/см процесів зварювання сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) на сумарне значення глибини проплавлення h із підсиленням шва a (1, 2) і на ширину шва B (3, 4): 1, 3 – лазер-Р-МІГ ($P = 4$ кВт); 2, 4 – Р-МІГ

разі застосування попереднього шабрення крайок і хімічного травлення електродного дроту, а також забезпечення надійного газового захисту зварювальної ванни. В умовах проведення експериментів внутрішні пори діаметром 0,2...0,8 мм спостерігалися у кількості порядку 5...10 шт/100 мм шва. Схильність до тріщиноутворення при отриманні з'єднань дослідженими способами зварювання встановлена не була. Дослідження мікроструктур швів, одержаних лазерним, Р-МІГ і лазер-Р-МІГ зварюванням показали залежність структури швів від способу зварювання, яка може бути визначена через дендритний параметр (рис. 8). У разі лазерного зварювання дендритний параметр становить до 8 мкм (рис. 8, а), при лазер-Р-МІГ зварюванні – збільшується до 10 мкм (рис. 8, б), при Р-МІГ – становить 13...15 мкм (рис. 8, в).

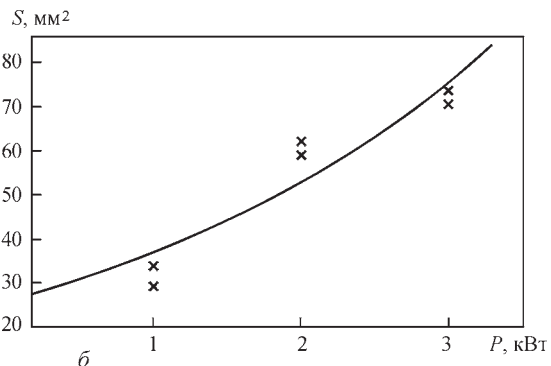
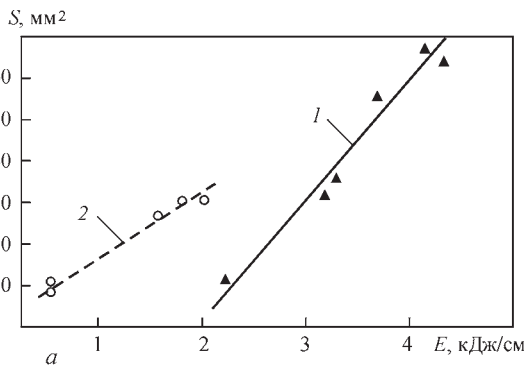


Рис. 7. Вплив погонної енергії E , кДж/см (а) і потужності лазерного випромінювання P , кВт (б) на площу S , мм² поперечного перетину швів при лазер-Р-МІГ зварюванні сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм)

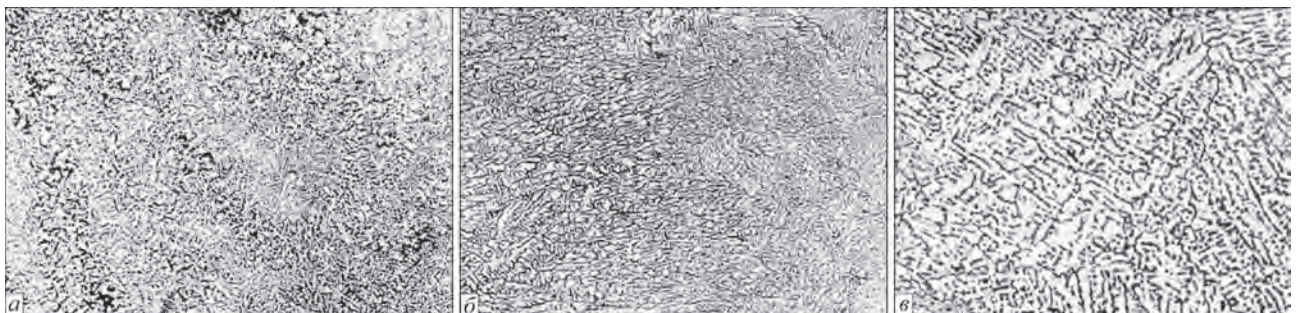


Рис. 8. Мікроструктура металу швів сплаву 1561, отриманих способами зварювання ($\times 250$): а – лазерним; б – лазер-Р-МІГ; в – Р-МІГ

Мікроструктура металу швів при всіх досліджуваних способах зварювання переважно залежить від способу та режиму зварювання. Будова металу шва визначається формою і розмірами зерен та їх внутрішньою будовою, а також формою, розмірами та розташуванням хімічних сполук, які виділяються при кристалізації. При близьких розмірах зерен, отриманих лазер-Р-МІГ та Р-МІГ зварюванням, гілки дендритів можуть бути як тонкими (у випадку лазер-Р-МІГ, рис. 8, б) так і товстими (при Р-МІГ, рис. 8, в), а евтектичні включення – відповідно дрібними або великими.

Сформована структура відповідним чином впливає на механічні властивості отриманих зварних з'єднань. Випробування на статичне розтягування показало, що Р-МІГ зварювання дозволяє досягти значень тимчасового опору руйнування 314...323 МПа, а лазер-Р-МІГ зварювання – 327...336 МПа. В усіх випадках руйнування відбувалося по зоні сплавлення швів з основним металом. З урахуванням міцності основного металу (~350 МПа) можна вважати, що Р-МІГ зварювання забезпечує міцність з'єднань на рівні 90...92 %, а лазер-Р-МІГ – 93...96 %.

Обговорення результатів досліджень зварювання алюмінієвих сплавів. Досліди показують, що при поєднанні лазерного і Р-МІГ процесів зварювання в один спільний, вплив сфокусованого лазерного випромінювання, в першу чергу, здійснюється створенням парогазового каналу (key-hole), а вплив дуги плавкого електрода – покращенням поглинання лазерного випромінювання,

створенням ванни певної ширини, привнесенням додаткового металу і формуванням швів із певними геометричними параметрами. Зі збільшенням потужності лазерної і дугової складових спільного процесу збільшується густина випаровування зі зварювальної ванни і викидів з неї бризок. Це призводить до збільшення концентрації шкідливих зварювальних аерозолів і зниження ефективності дії лазерного випромінювання через його розсіювання, віддзеркалювання від ванни та інші втрати потужності. У свою чергу, Р-MIG зварювання характеризується вдвічі більшою погонною енергією і приблизно у 2...3 рази більшою шириною швів, ніж лазер-Р-MIG зварювання (рис. 2), що може призводити до більших значень параметрів залишкового напружено-деформованого стану зварних конструкцій. Проте, правильний вибір параметрів режимів здатний забезпечити прийнятні результати при застосуванні кожного з розглянутих процесів.

Одним з найбільш важливих факторів, що впливає на глибину проплавлення при лазер-Р-MIG зварюванні, є співвідношення потужностей лазерної та дугової складових зі швидкістю процесу. Так, при зварюванні із швидкістю 60 м/год збільшення швидкості подачі електродного дроту з 10,9 до 12,2 м/хв (відповідно з $I = 162$ А, $U = 22,4$ В до $I = 194$ А, $U = 23$ В) майже не вплинуло на збільшення глибини проплавлення, проте збільшило ширину шва з $B = 10,1$ мм до $B = 13,5$ мм (табл. 2). Це пов'язано із заливанням парогозового каналу (keyhole) рідким металом електродного дроту, яке здійснюється крапельним способом і є протифазним автоколиванням парогозового каналу (keyhole). В інших випадках, наприклад, при лазер-Р-MIG зварюванні зі швидкістю 45 м/год, крапельне перенесення електродного металу співпадає з автоколиваннями парогозового каналу (keyhole) і сприяє значному підвищенню глибини проплавлення при збільшенні швидкості подачі електродного дроту з 8,3 ($I = 123$ А, $U = 21,1$ В) до 9,3 ($I = 142$ А, $U = 21,1$ В) м/хв (табл. 2).

Зростання напруги на дузі із одночасним зменшенням зварювального струму під впливом лазерного випромінювання при Р-MIG зварюванні (рис. 4), в першу чергу, пов'язано з підвищенням іонізації прикатодної області зварювальної дуги випромінюванням і з відповідною зміною вольт-амперних характеристик дуги. Крім того, поглиблення зварювальної ванни за рахунок утворення сфокусованим лазерним випромінюванням парогозового каналу призводить до певного подовження дуги, що викликає зростання напруги на дузі (до 0,5...1,0 В). Водночас додаткова іонізація зони дії стовпа дуги може призводити до певного (~10 А) зниження зварювального струму. Ця тенденція прямо пропорційна збільшенню потужності лазерного випроміню-

вання і стає помітною при її значенні понад 1 кВт при дуговій потужності порядку 2 кВт.

Відсутність збільшення виділення зварювальних аерозолів при переході від Р-MIG до лазер-Р-MIG зварювання може бути пов'язане із двома процесами, які відбуваються під дією лазерного випромінювання. З одного боку, вплив потужності лазерного випромінювання сприяє збільшенню випаровування алюмінію, магнію та інших елементів і утворенню таких аерозолів, як Al_2O_3 , MgO та MnO_2 . З іншого боку, під дією віддзеркаленого від зварювальної ванни лазерного випромінювання анодна область електродного дроту додатково нагрівається і збільшується (тобто збільшується поверхня охолодження утвореної на кінці електродного дроту краплі металу дуговим розрядом). При цьому густина струму знижується, одночасно зменшуючи інтенсивність утворення зварювальних аерозолів.

Основний фактор, який визначає будову мікроструктури швів – це швидкість охолодження при кристалізації. Тому для оцінки структури головним показником процесу зміни швидкості кристалізації металу швів обрали дендритний параметр (рис. 8). Розміри дендритного параметра залежать від співвідношення потужностей лазера та дуги. У дослідженому випадку дендритний параметр лазер-Р-MIG зварювання (10 мкм) був дещо ближчим до випадку лазерного зварювання (8 мкм), ніж Р-MIG процесу (13...15 мкм), що пояснювалось більшою швидкістю зварювання (1,0 м/хв) і меншою погонною енергією (~2,4 кДж/см). Таким зменшенням дендритного параметру можна пояснити підвищення рівня механічних властивостей з'єднань, отриманих лазер-Р-MIG зварюванням (збільшення міцності на 3...4 %).

Висновки

1. Встановлено, що при лазер-Р-MIG зварюванні сплаву 1561 вплив дугового джерела енергії сприяє покращенню поглинання лазерного випромінювання і якісному формуванню підсилення шва, а вплив лазерного джерела призводить до збільшення глибини проплавлення за рахунок утворення парогозового каналу (keyhole) і до зменшення густини струму анодної області дуги на електродному дроті, що зменшує викиди зварювальних аерозолів. При цьому ефективність дії лазерного випромінювання може знижуватися через втрати потужності із крапельним розбризкуванням металу зі зварювальної ванни і заливанням парогозового каналу (keyhole) рідким металом електродного дроту, чого можна запобігти підбором співвідношення швидкості зварювання і лазерної та дугової потужностей.

2. Дія сфокусованого лазерного випромінювання на процес Р-MIG зварювання сплаву 1561 стає помітною починаючи з 1 кВт і проявляється у екс-

понентному збільшенні глибини проплавлення і площі поперечного перетину швів із зростанням потужності. Підвищення потужності лазерного випромінювання призводить до зростання напруги на дузі з 1...2 В при 2 кВт до 0,1...0,3 В при 4 кВт із одночасним зменшенням зварювального струму з 13...15 А до ~ 6 А відповідно, у разі швидкості зварювання 0,5 м/хв.

3. Встановлено, що застосування Р-MIG процесу для зварювання сплаву 1561 товщиною 6 мм потребує погонної енергії 4,5...5,0 кДж/см і дозволяє сформувати регулярну структуру металу швів із дендритним параметром 13...15 мкм і міцністю з'єднань 90...92 % від міцності основного металу. Введення в процес зварювання сфокусованого випромінювання Nd:YAG-лазера потужністю 3,0 кВт дозволяє приблизно вдвічі зменшити погонну енергію, за рахунок чого дендритний параметр зменшується до 10 мкм, а міцність з'єднань збільшується до 93...96 % від міцності основного металу.

Список літератури/References

1. Benedyk, J.C. (2010) 3 – Aluminum alloys for lightweight automotive structures, Ed. by P.K. Mallick. In: *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing, 79–113. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845697822.1.79>
2. Sun, Y. (2023) The use of aluminum alloys in structures: Review and outlook. *Structures*, Vol. 57(5), 105290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105290>
3. Hung, F.-S. (2020) Design of lightweight aluminum alloy building materials for corrosion and wear resistance. *Emerging Materials Research*, 9(3), 750–757. DOI: <https://doi.org/10.1680/jemmr.19.00177>
4. Ambriz, R.R., Mayagoitia, V. (2011) *Welding of Aluminum Alloys*. In: *Book: Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloys*, Ed. by Prof. Zaki Ahmad, 516, 63–86. DOI: <https://doi.org/10.5772/18757>
5. Khaskin, V.Y. (2013) Development of laser welding of aluminium alloys at the E.O. Paton Electric Welding Institute. *The Paton Welding J.*, 5, 51–55.
6. Bushma, A.I. (2015) State-of-the-art of hybrid laser-plasma welding (Review). *The Paton Welding J.*, 8, 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.08.04>
7. Bunaziv, I., Akselsen, O. M., Salminen, A., Unt, A. (2016) Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy. *J. Materials Proc. Technology*, 233, 107–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.02.018>
8. Sánchez-Amaya, J. M., Pérez, T. D., Rovira, L. G., Botana, J. (2009) Laser welding of aluminium alloys 5083 and 6082 under conduction regime. *Appl. Surface Sci.*, 255(23), 9512–9521. DOI: 1 <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.081>
9. Jiang, Z., Hua, X., Huang, L. et al. (2018) Double-sided hybrid laser-MIG welding plus MIG welding of 30-mm-thick aluminium alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 97, 903–913. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1997-7>
10. Babych, O.A., Korzhuk, V.M., Grynyuk, A.A. et al. (2020) Hybrid welding of aluminium 1561 and 5083 alloys using plasma-arc and consumable electrode arc (Plasma-MIG). *The Paton Welding J.*, 1, 7, 11–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.07.02>
11. Krivtsun, I.V., Khaskin, V.Yu., Korzhik, V.N., Luo, Ziyi (2015) Industrial application of hybrid laser-arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, 7, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.07.07>
12. (2018) *Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys, 2 Vols. Ed. by G. E. Totten et al., 1st Edition.* – Boca Raton, CRC Press, 1232 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351045636>
13. DuPont, J. N., Marder, A. R. (1995) Thermal efficiency of arc welding processes. *Welding J.*, 74, 406–416.
14. Hälsig, A., Mayr, P. (2013) Energy balance study of gas-shielded arc welding processes. *Welding in the World, Le Soudage dans le Monde*, 57(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0073-z>
15. De Oliveira, A.F.M., dos S. Magalhães, E., dos S. Paes, L.E. et al. (2023) A thermal analysis of laser beam welding using statistical approaches. *Processes*, 11(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11072023>
16. Levchenko, O.G., Mashin, V.S. (2003) Sanitary-hygienic characteristic of process of consumable electrode inert-gas welding of AMg6 aluminium alloy. *The Paton Welding J.*, 1, 46–48.
17. Cole, H., Epstein, S., Peace, J. (2007) Particulate and gaseous emissions when welding aluminium alloys. *J. of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(9). DOI: <https://doi.org/10.1080/15459620701516162>

INFLUENCE OF SOLID-STATE LASER RADIATION ON THE PROCESS OF PULSED-ARC WELDING OF ALUMINIUM ALLOY 1561

Y. Zhao, X. Wang, Z. Liu, V. Khaskin

Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, China. E-mail: 13826482032@163.com

The results of consumable electrode pulsed-arc welding of aluminium alloy 1561 of 6 mm thickness (P-MIG) with and without addition of focused radiation of the Nd:YAG laser were analyzed. During laser-P-MIG welding, the influence of the arc energy source improves absorption of laser radiation and promotes high-quality formation of the weld reinforcement, and the influence of the laser source leads to an increase in the depth of penetration due to the formation of a vapour-gas channel (keyhole) and to a decrease in the current density of the anode region of the arc on the electrode wire, which reduces emissions of welding aerosols. Factors influencing the effectiveness of laser radiation during laser-P-MIG welding were determined. It is shown that an increase in laser power leads to an increase in arc voltage with a simultaneous decrease in welding current. Formation of high-quality welds by P-MIG welding of alloy 1561 requires an energy input of 4.5...5.0 kJ/cm. Here, a regular structure of the weld metal with the dendritic parameter of 13...15 μm and joint strength of 90...92 % of the strength of the base metal is formed. Introduction of focused radiation of a 3.0 kW Nd:YAG laser into the welding process allows reducing the energy input by approximately half, due to which the dendritic parameter decreases to 10 μm, and the strength of the joints increases to 93...96 % of base metal strength. 17 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

Keywords: aluminum alloy, consumable electrode pulsed arc welding (P-MIG), Nd:YAG-laser radiation, modes, welding aerosols, structures, strength.

Отримано 30.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 04.06.2024

Прийнято 29.07.2024

ОТРИМАННЯ КОАКСІАЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ РІЗНОРІДНИХ МЕТАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИБУХУ

А.Г. Бризгалін¹, Є.Д. Пекар¹, С.Д. Венцев¹, М.О. Пашин¹, П.С. Шльонський²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: andreybag60@ukr.net

²Liaoning Xin Huayang Weiye Equipment Manufacturing company Ltd № 1 Road, Tieling high-tech industrial development zone, Liaoning province, China. E-mail: shlensk@ukr.net

На відміну від різноманітних видів зварювання плавленням, зварювання вибухом дозволяє з'єднувати метали і сплави практично в будь-яких поєднаннях, що забезпечує виробам, що отримуються з його допомогою, поєднання службових властивостей застосовуваних матеріалів при високому рівні міцності, герметичності, втомної міцності і т.п. Крім випущених у досить великих обсягах біметалів для хімічного та нафтового обладнання, зварювання вибухом отримують вироби з особливими характеристиками для різних галузей промисловості. У особливий клас завдань можна виділити отримання з допомогою вибуху коаксіальних (зварювання відбувається за утворюючими осесиметричних співвісних труб) з'єднань різних металів, які є більш економічними, ніж альтернативні методи їх отримання. У деяких випадках нероз'ємне з'єднання може бути створене обтисканням вибухом без зварювання елементів, що з'єднуються. У цій роботі представлено низку розроблених в Інституті електрозварювання технологічних процесів отримання коаксіальних виробів, які використовують як зварювання, так і обтискання вибухом. Представлені розробки свідчать про широкий спектр практичних завдань, які можуть бути вирішені за допомогою вибуху. Бібліогр. 18, рис. 11.

Ключові слова: коаксіальні з'єднання, зварювання вибухом, біметал, перехідник, прутки, муфта, нероз'ємне з'єднання

Вступ. Коаксіальне зварювання вибухом (ЗВ) циліндричних виробів використовується в меншому обсязі у порівнянні з ЗВ листового металу по паралельній схемі, однак з її допомогою вирішуються дуже важливі практичні завдання. Насамперед це корозійностійкі біметалічні труби хімічного та нафтового машинобудування, в яких міцність забезпечується трубою з вуглецевої сталі, а стійкість до середовища відповідними металами або сплавами (нержавіюча сталь, мідь, латунь, алюміній, ніобій та ін.).

Також біметалічні труби та перехідники використовуються у кріогенній, космічній, авіаційній техніці, прискорювачах елементарних частинок та інших наукомістких виробництвах. Аналіз публікацій на тему показує, що з моменту відкриття ЗВ як технології виготовлення біметалів (1959 р.) великий обсяг досліджень з коаксіального зварювання був проведений у США та СРСР, були запропоновані та апробовані основні схеми зварювання, встановлені особливості та відмінності від ЗВ плоских листів. Огляд технологічних схем коаксіального зварювання вибухом труб і труб із трубними решітками апаратів хімічного виробництва наведено в [1, 2]. Однак із середини 1960-х років кількість публікацій різко скоротилася і почала носити, як правило, інформаційний характер з посиланнями на раніше опубліковані роботи. Це пов'язано, мабуть, з розвитком промислових технологій і, відповідно, відсутністю інтересу у виробників до опублікування своїх технологічних напрацювань.

У той же час, слід зазначити деякі публікації, що відрізняються новим технічним підходом до вирішення завдань коаксіального зварювання.

У роботі [3] запропоновано ЗВ здійснювати за допомогою води як середовища, яке передає робочий тиск (рис. 1).

У роботі [3] запропоновано ЗВ здійснювати за допомогою води як середовища, яке передає робочий тиск (рис. 1).

Як вибухова речовина (ВР) використовувалася суміш гексогену з калієвою селітрою. Суміш розміщувалася у циліндричній алюмінієвій оболон-

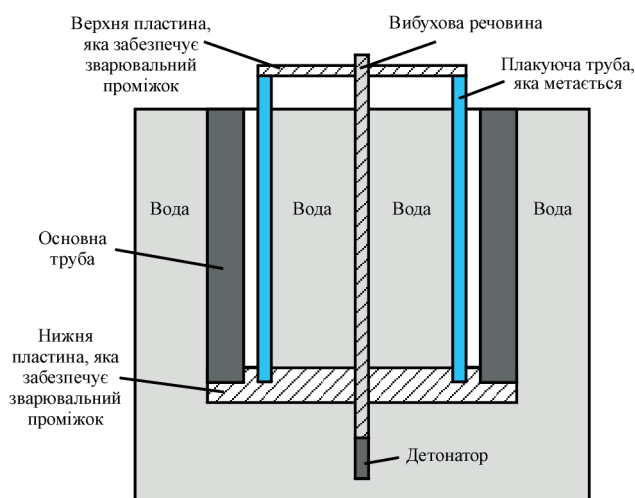


Рис. 1. Зварювання вибухом коаксіально розташованих труб

Бризгалін А.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-5886-3069>, Пекар Є.Д. <https://orcid.org/0000-0001-5025-4445>, Венцев С.Д. – <https://orcid.org/0000-0003-4753-5259>, Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Шльонський П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3566-1752>

© А.Г. Бризгалін, Є.Д. Пекар, С.Д. Венцев, М.О. Пашин, П.С. Шльонський, 2024

ці. Швидкість детонації заряду варіювалася залежно від діаметра оболонки, але завжди була близькою до 7000 м/с. Якщо врахувати, що швидкість детонації при ЗВ становить 2000...3000 м/с, наведена схема представляє інтерес для дослідження. У роботах [4, 5] запропоновано метод теоретичного прогнозування швидкості зіткнення металу труб, що зварюються – основного параметра ЗВ, що визначає енергетику процесу при підводному вибуховому зварюванні та зварюванні на повітрі відповідно.

Однак визначення режимів коаксіального ЗВ є досить складною проблемою і здійснюється в даний час для кожного типу з'єднань окремо розрахунково-експериментальним шляхом. Інтерес також становлять способи отримання нероз'ємних з'єднань (що не розбираються на складові без їх часткової руйнації) з допомогою вибуху без обов'язкового здійснення зварювання.

У цій роботі приведені технологічні рішення різних завдань за допомогою розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона методів отримання коаксіальних з'єднань.

Виготовлення коаксіальних мідно-алюмінієвих прутків за допомогою зварювання вибухом і протяжки. Струмopровідні шини електроапаратури відповідального призначення виконуються з міді, що має високу електропровідність і водночас високу щільність [6]. У разі її роботи при високій частоті струму (наприклад, в авіакосмічній техніці) заміна суцільних мідних шин на алюмінієві, що плаковані тонким шаром міді, забезпечує значне зниження маси виробів при збереженні їх електропровідності.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена технологія виготовлення біметалевих мідно-алюмінієвих прутків за допомогою з'єднання вибухом мідної оболонки з алюмінієвим прутком і подальшою протяжкою [7].

Границя з'єднання не мала характерного для зварювання вибухом хвилеутворення, що свідчить про виконання зварювання на нижній межі допустимих режимів, тобто з мінімальним вкладенням енергії [8]. Це дозволило звести до мінімуму (порядку 10 % по довжині з'єднання) кількість інтерметалідів, що утворюються при зварюванні.

Отримання необхідного діаметра прутків 8,0 і 9,0 мм здійснювалося протяжкою біметалевих заготовок діаметром 26 мм, при цьому не потрібно проведення термообробки заготовок на всіх етапах операції протяжки.

Питомий електричний опір біметалевого прутка постійному струму в перерахунку на температуру 20 °C становив $0,027 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Повітря в зазорі утворює ударну хвилю, фронт якої рухається зі швидкістю, більшою за швидкість детонації, швидкість цього фронту постійно знижується через збільшення опору повітря, що знаходиться в зазорі. На деякій довжині коаксіальних елементів, складених для зварювання, швидкість витoku повітря із зазору стає меншою за швидкість детонації. Певний об'єм повітря залишається між елементами, що зварюються, утворюючи бульбашки. Рух ударної хвилі призводить до значного розігріву поверхонь елементів [9], що зварюються, аж до закипання алюмінію. Це суттєво впливає на якість отриманих зварних з'єднань. Щоб запобігти цьому, було запропоновано вакуумувати зазор зварювання. Були проведені експерименти з аналогічними, але довшими, зразками на тих же режимах з вакуумуванням і без зварювального зазору. Остаточний тиск при вакуумі становив 1 Па [10].

Після виконання зварювання вибухом без вакуумування на відстані приблизно 250 мм від краю заготовки, що ближче до точки ініціювання, спостерігається початок дефектів у вигляді розриву плакуючого шару і пошкодження поверхні алюмінію, яка набуває рваної форми, є також дефекти у вигляді бульбашок, що з'являються на відстані 100 мм від краю зразка. На зразку з вакуумуванням спостерігається аналогічна картина, але дефекти з'являються на відстані приблизно 500 мм. Утворення дефектів у зразку з вакуумуванням пояснюється присутністю в зазорі повітря, хоч і більш розрідженого.

Характерним для обох зразків є те, що більшість бульбашок і всі дефекти у вигляді розривів сконцентровані на одній утворюючій. Очевидно, це пов'язано з тим, що внаслідок нерівномірності фронту детонації, по одній із утворюючих він завжди відставатиме. Така нерівномірність буде залежати, насамперед, від зміщення центру ініціювання заряду вибухової речовини (ВР) від центру зварювальної зборки, а також від нерівномірності швидкості детонації і товщини заряду по довжині зразка. Слід зазначити, що при зварюванні з вакуумуванням інтерметаліди, що утворюються, мали менший розмір. Мабуть, це пов'язано з тим, що при зварюванні з вакуумом відсутній нагрів за рахунок повітря, що витікає із зазору (рис. 2).

Можна зробити висновок, що вакуумування зазору при зварюванні вибухом коаксіальних заготовок зовнішнім зарядом підвищує якість зварного з'єднання, що полягає у збільшенні довжини зварених заготовок, на якій відсутні дефекти типу бульбашок і розриву зовнішнього шару, а також

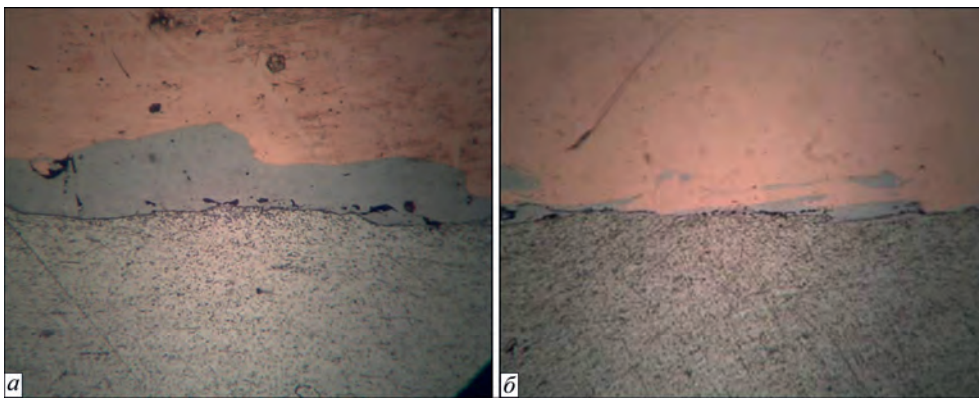


Рис. 2. Інтерметаліди на межі з'єднання мідь-алюміній після зварювання вибухом: *а* – без вакуумування; *б* – з вакуумуванням

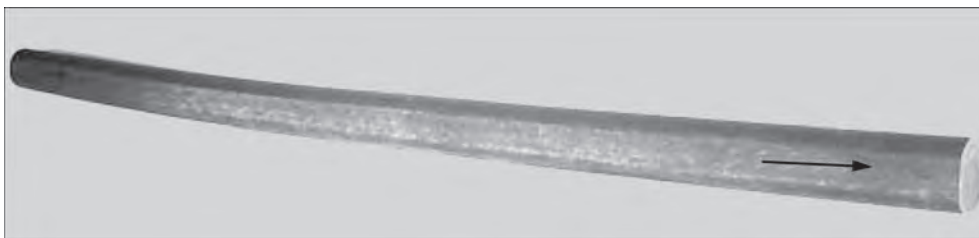


Рис. 3. Біметалічний стрижень, отриманий зварюванням вибухом мідної основи зі сталеву трубою

зменшенні розміру і кількості інтерметалідів при зварюванні пари мідь + алюміній. Слід зазначити, що при зварюванні міцніших матеріалів з більшою температурою плавлення видимих дефектів не утворюється, зберігається цілісність матеріалів, одержуваний зварюванням вибухом стрижень має меншу деформацію по довжині. На рис. 3 наведено фото стрижня сталь-мідь для виготовлення катода рафінування міді, що виготовлено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Трубні перехідники з біметалів широко використовуються у суднобудуванні, металургії, трубопроводному транспорті, атомній енергетиці.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено технологію виготовлення так званого квазистикового трубного перехідного елементу [11]. Він є патрубком з однаковою геометрією поперечного перерізу по всій його довжині, однак має на своїх кінцях різні матеріали, які з'єднані між собою зварюванням вибухом (рис. 4).

Подальше приєднання елементів трубопроводу до перехідника здійснюється зварюванням плавленням однорідних матеріалів, що дозволяє досягати високих службових властивостей зварних з'єднань. Довжина перехідника практично не обмежена і дозволяє унеможливити термічний вплив від дугового стикового зварювання нарощування трубопроводу на з'єднання, отримане зварюванням вибухом.

Можливі варіанти поєднання зварюванням вибухом практично будь яких металів. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона виготовлені перехідники із наступних ме-

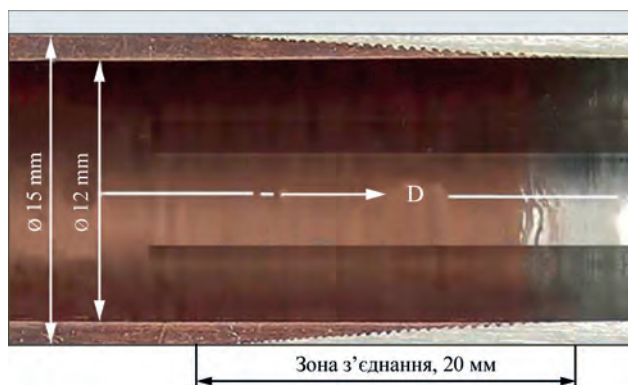


Рис. 4. Квазистиковий трубний перехідник

талів: алюміній + мідь; мідь + сталь; нержавіюча сталь + сталь 20.

Дослідження міцності зчеплення шарів проводили шляхом випробувань на розтягування біметалевих трубних зразків і таких, які вирізалися вздовж утворюючої перехідника. Ширина зразка становила 5...10 мм залежно від його діаметра, довжина дорівнювала довжині перехідника. Затискачі розтяжної машини встановлювалися так, щоб від них до ближнього краю стику було щонайменше 20 мм. З кожного перехідника вирізувалося по 3 зразки на розтяг.

У всіх випадках руйнування зразків відбувалося за слабшим металом. Не було жодного випадку руйнування зразків у зоні з'єднання.

Загальний вид сталь-мідних трубних перехідників представлений на рис. 5.

Перехідники успішно пройшли випробування на розтяг, стійкість до підвищеного тиску та вакууму і гелієву щільність.

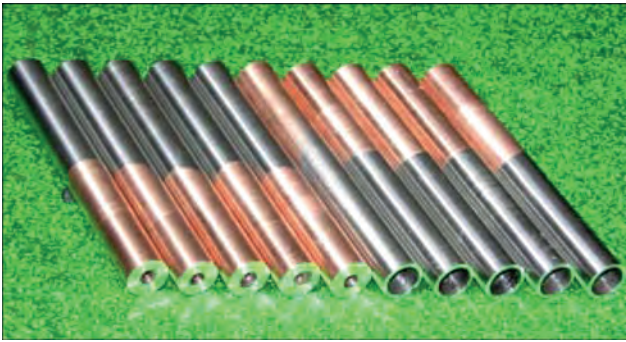


Рис. 5. Загальний вид трубних Cu-сталь перехідників

Таке стикове з'єднання труб зварюванням вибухом отримано вперше у світовій практиці.

В електротехнічній промисловості досить часто застосовується з'єднання мідних і алюмінієвих струмопровідних елементів. Прямий контакт таких елементів без зварювання супроводжується протіканням електрохімічної корозії та вигорянням дорогих матеріалів і підвищенням в результаті цього перехідного опору, зростаючого під час експлуатації. Будь-який вид зварювання даних матеріалів призводить до утворення інтерметалідів типу Al_nCu_m , які можуть вплинути на електротехнічні властивості з'єднання. Зварювання вибухом є найбільш ефективним способом отримання мідно-алюмінієвих електричних провідників з підвищеними експлуатаційними властивостями. Ефективність впровадження конструкцій композитних струмопровідних вузлів, одержуваних зварюванням вибухом, підтверджується зниженням перехідного опору в 1,7...2,5 рази і збільшенням терміну служби в 5...7 разів [8].

Зокрема, для з'єднання мідних і алюмінієвих гнучких багатожильних кабелів використовуються біметалеві муфти, що є порожнистим циліндром з алюмінію, половина довжини якого зсередини заплакована вибухом шаром міді. Мідний кабель вставляється в муфту з боку плакування, алюмінієвий – на звороті. З'єднання здійснюється шляхом механічного обтискання муфти (рис. 6).

З технологічних міркувань у деяких випадках доводиться зварювання вибухом здійснювати зовнішнім зарядом. Тобто, в такому разі метається товстіший алюміній, що не характерно для зварювання вибухом [12]. Тонка мідна трубка є опорною

і повинна бути посилена зсередини, щоб уникнути її деформації під час вибуху.

Дослідження різних варіантів посилення мідної трубки показали, що найбільш раціональним є наступний: всередину вертикально встановленої мідної трубки вставляється жорсткий, наприклад, сталевий стрижень. Зазор між стрижнем і стінкою трубки заливається сплавом Вуда, що має температуру плавлення приблизно 90 °С. Такий стрижень за кімнатної температури не деформується зовнішнім тиском продуктів детонації. Для вилучення опори з мідної трубки після ЗВ достатньо нагріти отриману заготовку до 90 °С, наприклад, в киплячій воді.

Мікроструктура з'єднання міді з алюмінієм має незначний хвильовий профіль з невеликою кількістю інтерметалідних включень.

Оскільки стандартні методики для оцінювання міцності на відрив шарів біметалевого кільця, вирізаного із трубної заготовки, відсутні, то для якісного оцінювання міцності зчеплення шарів була використана відома методика випробуванням біметалевих кілець на сплющування [13]. Випробування проводились з метою виявлення тріщин і розшарувань в зоні з'єднання під дією навантаження.

Відсутність розшарувань на границі з'єднання свідчить про високу якість ЗВ і збереження на високому рівні пластичних властивостей обох металів.

При виготовленні виробів складної конфігурації може бути використана комбінація ЗВ зі зварюванням плавленням. Характерним прикладом може бути створення перехідника лінійного колайдера [13, 14].

Перехідник служить для з'єднання окремих кріомодулів в одне ціле. Елементи кріомодуля, що з'єднуються, – ніобієвий надпровідний резонатор, який має бути приварений електронно-променевим зварюванням до ніобієвого патрубку перехідника, а коаксіально розташований по відношенню до ніобієвого резонатора кожух із нержавіючої сталі має бути привареним до диску перехідника, виготовленого із тієї ж нержавіючої сталі. Ніобієвий резонатор знаходиться всередині кожуха із

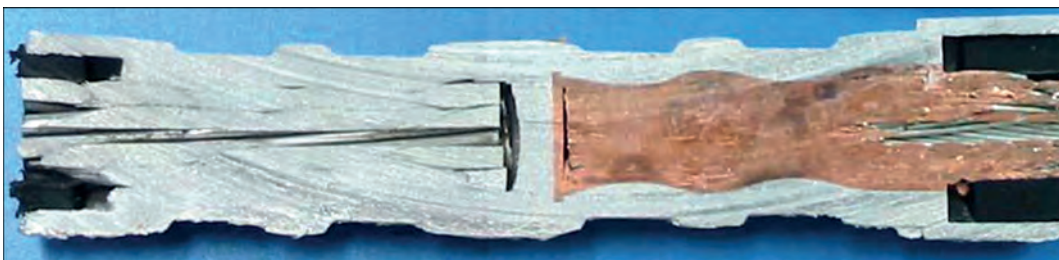


Рис. 6. З'єднання мідного та алюмінієвого кабелів муфтами, що обтискаються

нержавіючої сталі, в ньому створюється вакуум, під кожух заливається рідкий гелій. Таким чином, перехідник повинен забезпечувати вакуумну та гелієву щільність і працездатність вузла в умовах високочастотних електромагнітних навантажень при криогенних температурах. Схема і фото перехідника наведена на рис. 7.

Відомо, що найбільш якісні зварні з'єднання отримуються при зварюванні однорідних матеріалів. Таким чином, перехідник має забезпечити виконання зварних з'єднань ніобію з ніобієм, а нержавіючої сталі з нержавіючою сталлю. Тобто перехідник повинен складатися як мінімум з двох металів – ніобію та нержавіючої сталі. Використання для отримання з'єднання ніобію з нержавіючою сталлю будь-яких способів зварювання плавленням, в тому числі електронно-променевого зварювання, неприйнятно для вирішення поставленого завдання у зв'язку з утворенням інтерметалідів типу Nb_xFe_y , які не дозволяють забезпечити потрібну щільність з'єднання. Виготовлення пере-

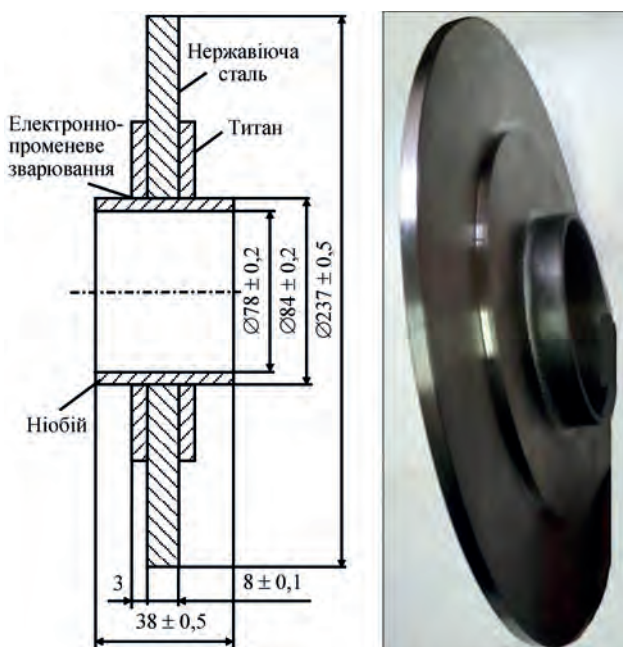


Рис. 7. Конструкція перехідника, що забезпечує відсутність утворення інтерметалідів ніобію при зварюванні

хідника зварюванням вибухом ніобієвої трубки зі сталевим диском виявилося досить дорогим процесом в зв'язку з великими втратами ніобію при наступній механічній обробці.

Раніше проведені експерименти показали, що при електронно-променевому зварюванні ніобію з титаном не утворюються інтерметаліди і забезпечується необхідна щільність з'єднань по гелію і вакууму. В зв'язку з цим було запропоновано наступний варіант виготовлення перехідника.

Диск із нержавіючої сталі спочатку плакується з двох сторін титаном за допомогою зварювання вибухом, потім, після надання отриманому триметалу необхідної форми (шляхом правки та обточування у розмір) вирізається отвір під ніобієвий патрубок. Патрубок вставляється в отвір і приварюється до титану електронно-променевим зварюванням. Можливе утворення інтерметалідів в поєднанні титану зі сталлю, що отримується зварюванням вибухом, не впливає на працездатність перехідника, оскільки через нього гелій не може потрапити в порожнину ніобієвої труби.

Механічні випробування отриманих за допомогою ЗВ з'єднань на відрив шарів показали задовільну міцність (375 МПа), загин біметалу на 180° не виявив утворення розшарувань або тріщин. Експериментально були підібрані оптимальні режими електро-променевого зварювання титану з ніобієм (рис. 8).

Виготовлені по комбінованій технології зразки були охолоджені рідким гелієм до температури 4,2 °К, а потім швидко нагріті до кімнатної температури за допомогою фенів. Зразки після проведення таким чином термічного циклування забезпечували гелієву та вакуумну щільність [15].

Існуючі способи з'єднання арматури при будівництві об'єктів із залізобетону [16] мають ряд недоліків. Розробка високопродуктивних, економічних та ергономічних способів з'єднання термозміцненої арматури, що забезпечують міцнісні

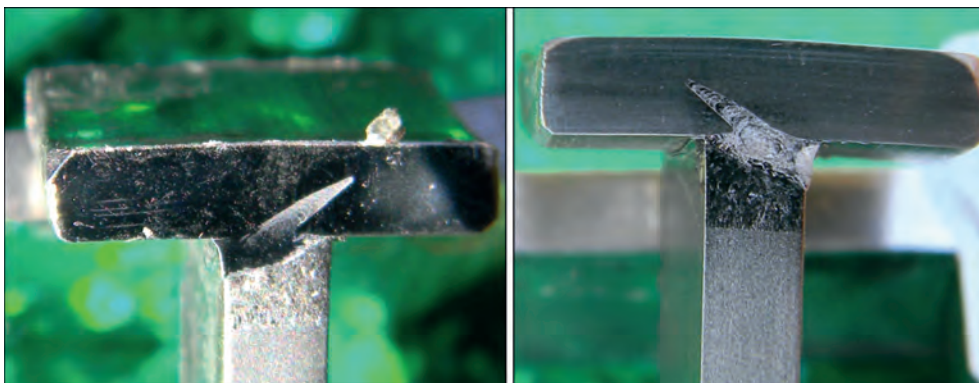


Рис. 8. Шліфи місця з'єднання ніобію з титаном електронно-променевим зварюванням

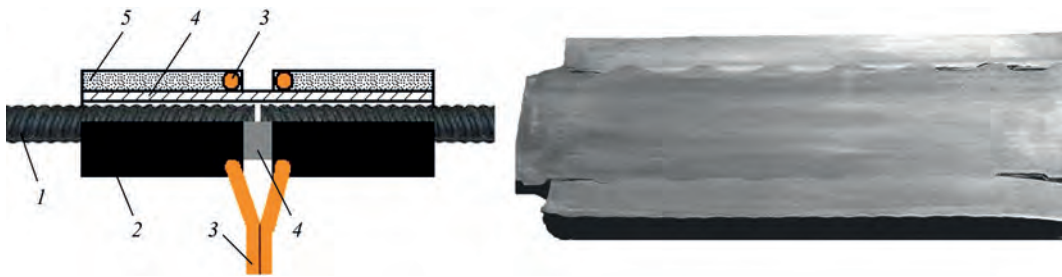


Рис. 9. Принципова схема та макрошліф з'єднання арматури вибухом: 1 – арматура; 2 – оболонка заряду; 3 – ініціюючий детонуючий шнур; 4 – муфта; 5 – вибухова речовина

властивості з'єднань на рівні основного металу, є на сьогоднішній день дуже актуальним завданням.

Одним з таких способів може бути з'єднання арматури муфтами, що обтискаються вибухом. Перевагами вибухової технології є: відсутність втрати міцності основного металу, можливість з'єднувати метали, які неможливо зварити способами плавлення без погіршення службових властивостей, наприклад, термічно зміцнену або біметалеву арматуру, покриту зовнішнім антикорозійним шаром, відсутність необхідності у використанні спеціального обладнання, незалежність від джерел енергопостачання, можливість виконувати роботи з високою продуктивністю.

Суть технології полягає в тому, що на кінці арматури, що поєднуються, симетрично відносно стику надягається стальна муфта (трубка) з розташованим на її зовнішній поверхні зарядом вибухової речовини. Тиск, що створюється вибухом заряду, обтискає метал муфти таким чином, що він приходить в щільний дотик з металом арматури. Наявність поперечних виступів на поверхні арматури забезпечує утворення нероз'ємного механічного з'єднання (рис. 9).

Міцність з'єднання при додаванні навантаження, що розтягує, буде визначатися міцністю металу муфти, міцністю поперечних виступів арматури, що працюють на зминання, і міцністю самої арматури. Розроблено метод розрахунку параметрів муфти і заряду, що забезпечують рівномірність з'єднання та металу арматури.

Проведено випробування на розрив та циклічну довговічність з'єднань арматури різного типороз-

міру та класу міцності. Муфти обтискалися зарядами із детонуючого шнура, який намотувався на муфту в кілька шарів (рис. 10).

Всі зразки, що випробовувалися на розрив, руйнувалися по основному металу.

Випробування на втому виконували відповідно до вимог ДСТУ [17] в лабораторних умовах ІЕЗ ім. Є.О. Патона при режимі осьового гармонійного розтягування в області багатоциклової довговічності з частотою 5 Гц і коефіцієнтом асиметрії циклу 0,4. Критерієм завершення випробувань служив повний злам зразка. Зразки зруйнувалися всередині муфти на відстані 10...35 мм від її краю.

Аналіз отриманих даних показує, що по опору втоми такі з'єднання не поступаються іншим широко застосовуваним у промисловості способам з'єднання арматури.

Колісні пари вагонів мають підвищений знос різьбових отворів для кріплення кришок підшипників в осях колісних пар [18]. Існуючі способи їх відновлення з використанням дугового зварювання або неприйнятні через неприпустимі термічні деформації (заплавлення отворів і нанесення нової різьби) або не надійні у зв'язку з динамічним характером робочих навантажень (вставка трубки в отвір, зварювання її з основним металом по верхньому краю та нарізання нового різьблення). В ІЕЗ ім. Є.О. Патона запропоновано приварювати ремонтну трубку до основного металу осі в зношених різьбових отворах методом зварювання вибухом та нарізання нової різьби (рис. 11).

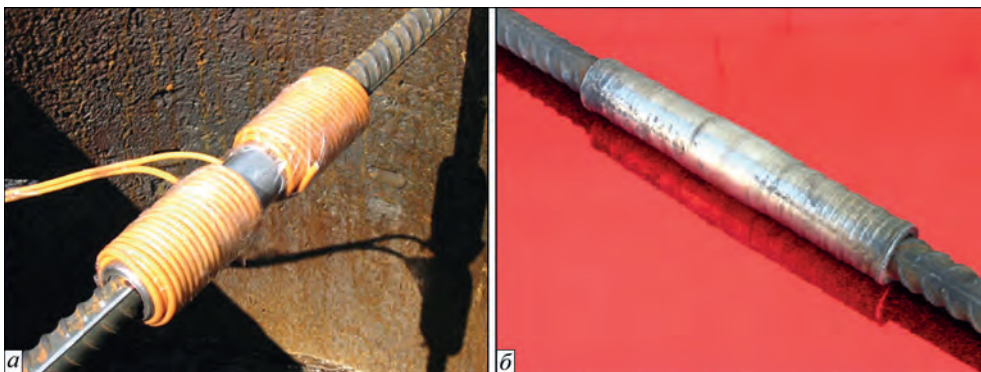


Рис. 10. Приклад обтискання муфти зарядом із детонуючого шнура до вибуху заряду (а) та після вибуху (б)

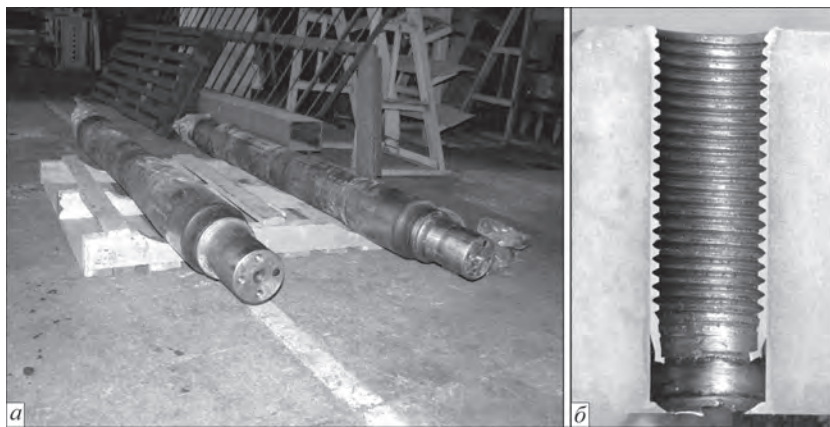


Рис. 11. Ремонт різбових отворів за допомогою зварювання вибухом: а – загальний вигляд осі колісної пари з чотирма різбовими отворами; б – макрошліф відновленого вибухом отвору з різбою

Як ВР використовувалася суміш амоніту з селітрою. Крайовий непровар, характерний для ЗВ, у верхній частині був відсутній, а в нижній частині не впливав на якість з'єднання в цілому, оскільки довжина знову нарізаної різби перевищувала довжину робочих витків болта. Газоутворення від вибуху не вплинуло на якість зварювання і не створило в отворі дефектів.

Мінімальне значення циклічної довговічності осей з різбовими отворами, відновленими методом зварювання вибухом, склало 122 000 циклів навантаження, що лише на 4 % нижче за базове значення для нових осей.

Дві колісні пари з відновленими вибухом отворами було встановлено на вагон та пройшли робочі випробування на полігоні Укрзалізниці. Після пробігу 100 000 км без утворення дефектів випробування було припинено.

Висновки

1. Міцність і довговічність коаксіальних зварених вибухом з'єднань, як правило, не нижче, ніж у таких же з'єднань, які отримані іншими способами.

2. Виготовлення складних виробів комбінацією зварювання вибухом та плавленням дозволяє уникнути утворення небажаних інтерметалідів та забезпечити необхідні робочі властивості виробу.

3. Вибухові технології можуть бути ефективно використані для створення коаксіальних з'єднань різного призначення.

Список літератури

1. Crossland B. Bahrani, A.S. Willia, J.D. Shribman, Victor (1967) Explosive welding of tubes to tubeplates. *Welding and Metal Fabrication*, **35**, 88–94.
2. Harry, J. Addison, Jr. James, F. Kowalick, Winston W. Cavtll (1969) *Explosion welding of cylindrical shapes. Report A69-3 of the department of the army frankford arsenal*, Philadelphia.
3. Yong, Yu, Honghao, Ma, Kai, Zhao et al. (2017). Study on Underwater Explosive Welding of Al-Steel Coaxial Pipes. *Central European J. of Energetic Materials*, **14** (1), 251–265. DOI: 10.22211/cejem/68696
4. Moujin Lin, Junjie Liao, Bing Xue, Dingjun Xiao, Jiangliang Li, Jing Ling (2023) Expansion velocity of metal pipe in underwater explosive welding. *J. of Materials Processing Technology*, **319**, October 2023, 118071. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118071>
5. Sina Gohari Rad, Siamak Mazdak, Ali Alijani (2023) Proposing an analytical model for predicting the dimensions of interfacial waves produced in the explosive welding of coaxial cylinders. *Thin-Walled Structures*, **190**, September 2023, 110982. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110982>
6. ДСТУ EN 13601:2010 Мідь та мідні сплави. Прутки, шина та дріт мідні загальної електричної призначеності. Технічні умови.
7. Брызгалін А.Г., Добрушин Л.Д., Шленский П.С. и др. (2015) Изготовление коаксиальных медно-алюминиевых прутков с помощью сварки взрывом и протяжки. *Автомат. сварка*, **3-4**, 72–76.
8. Лысак В.И., Кузьмин С.В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение.
9. Pervukhin, L.B., Shishkin, T.A., Pervukhina, O.L. (2012) Specificity of explosive welding in marginal zones. *Materials of symposium «Explosive production of new materials: Science, Technology, Business, and Innovations»*. Moscow, Torus Press Ltd.
10. Пашин М.О., Шльонський П.С., Брызгалін А.Г. та ін. (2021) Особливості формування структури коаксіальних з'єднань міді та алюмінію при зварюванні вибухом з вакуумуванням зварювального проміжку. *Автомат. зварювання*, **2**, 3–9. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.01>
11. Спосіб виготовлення біметалічних трубних перехідників за допомогою зварювання вибухом. Заявка на винахід №а 2022 02799 від 05.08.2022. Бюлетень промислової власності № 6, 07.02.2024.
12. Шльонський П.С. (2020) Зварювання вибухом мідно-алюмінієвих труб по «зворотній» схемі. *Автомат. зварювання*, **8**, 51–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.08.08>
13. Брызгалін А.Г., Пекарь Е.Д., Шленский П.С. (2017) Применение сварки взрывом для создания триметаллических переходников криомодулей линейного коллайдера. *Автомат. зварювання*, **12**, 34–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.12.04>
14. Basti, A., Bedeschi, F., Bryzgalin, A. et al. (2020) Upgrade of the ILC cryomodule. *arXiv.org > physics > arXiv:2004.05948*.
15. Sabirov, B., Basti, A., Bedeschi, F. et al. (2016) High Technology Application to Modernization of International Electron-Positron Linear Collider (ILC). *International Conference «New Trends in High-Energy Physics»*, Montenegro.
16. Брызгалін А.Г., Пекарь Е.Д., Шльонський П.С. та ін. (2022) З'єднання будівельної арматури за допомогою муфт, що обтискаються вибухом. *Автомат. зварювання*, **11**, 35–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.11.05>
17. ДСТУ Б В.2.6-169:2011 З'єднання зварні арматури та закладних виробів залізобетонних конструкцій.

18. Лобанов Л.М., Илларионов С.Ю., Добрушин Л.Д. и др. (2012) Восстановительное плакирование взрывом резьбового канала вагонных осей. *Автомат. сварювання*, **2**, 42–46.

References

1. Crossland, B. Bahrani, A.S. Willia, J.D. Shribman, V. (1967) Explosive welding of tubes to tubeplates. *Welding and Metal Fabrication*, **35**, 88–94.
2. Harry, J. Addison, Jr. James, F. Kowalick, Winston W. Cavtll (1969) *Explosion welding of cylindrical shapes. Report A69-3 of the department of the army frankford arsenal*, Philadelphia.
3. Yong, Yu, Honghao, Ma, Kai, Zhao et al. (2017) Study on Underwater Explosive Welding of Al-Steel Coaxial Pipes. *Central European J. of Energetic Materials*, **14** (1), 251–265. DOI: 10.22211/cejem/68696
4. Moujin Lin, Junjie Liao, Bing Xue, Dingjun Xiao, Jiangliang Li, Jing Ling (2023) Expansion velocity of metal pipe in underwater explosive welding. *J. Mater. Proc. Technol.*, **319**, October 2023, 118071. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118071>
5. Sina Gohari Rad, Siamak Mazdak, Ali Alijani (2023) Proposing an analytical model for predicting the dimensions of interfacial waves produced in the explosive welding of coaxial cylinders. *Thin-Walled Structures*, **190**, September 2023, 110982. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110982>
6. DSTU EN 13601:2010 *Copper and copper alloys. Copper rod, bar and wire for general electrical purposes. Specifications*.
7. Bryzgalin, A.G., Dobrushin, L.D., Shlensky, P.S. et al. (2015) Manufacture of coaxial copper-aluminium rods using explosion welding and drawing. *The Paton Welding J.*, **3-4**, 69-73.
8. Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Pervukhin, L.B., Shishkin, T.A., Pervukhina, O.L. (2012) Specificity of explosive welding in marginal zones. In: *Proc. of Symp. on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations*. Moscow, Torus Press Ltd.
10. Pashchin, M.O., Shlonskyi, P.S., Bryzgalin, A.G. et al. (2021) Features of formation of structure of coaxial joints of copper and aluminium in explosion welding with vacuuming of welding gap. *The Paton Welding J.*, **2**, 2-7. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.01>
11. *Method of manufacturing of bimetal pipe adapters using explosion welding*. Appl. for invent. No. 2022 02799 from 05.08.2022.
12. Shlyonskyi, P.S. (2020) Explosion welding of copper-aluminium pipes by the "reverse scheme". *The Paton Welding J.*, **8**, 51–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.08.08>
13. Bryzgalin, A.G., Pekar, E.D., Shlensky, P.S. et al. (2017) Application of explosion welding for manufacture of trimetallic transition pieces of cryomodules of linear collider. *The Paton Welding J.*, **12**, 34–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.12.04>
14. Basti, A., Bedeschi, F., Bryzgalin, A. et al. (2020) *Upgrade of the ILC cryomodule*. arXiv.org > physics > arXiv:2004.05948.
15. Sabirov, B., Basti, A., Bedeschi, F. et al. (2016) High Technology Application to Modernization of International Electron-Positron Linear Collider (ILC). In: *Proc. of Int. Conf. on New Trends in High-Energy Physics, Montenegro*.
16. Bryzgalin, A.G., Shlyonskyi, P.S., Pekar, E.D. et al. (2022) Joining building rebars using couplings compressed by explosion. *The Paton Welding J.*, **11**, 35–38. DOI: <https://doi.org/1037434/as2022.11.05>
17. DSTU B V. 2.6-169:2011 *Welded joints of rebars and embedded products of concrete structures*.
18. Lobanov, L.M., Illarionov, S.Yu., Dobrushin, L.D. et al. (2012) Repair explosion cladding of threaded channel of car axles. *The Paton Welding J.*, **2**, 42–46.

PRODUCING OF COAXIAL JOINTS OF DISSIMILAR METALS WITH THE HELP OF EXPLOSION

A.G. Bryzgalin¹, E.D. Pekar¹, S.D. Ventsev, M.O. Pashchin¹, P.S. Shlionskyi²

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

E-mail: andreybag60@ukr.net

²Liaoning Xin Huayang Weiye Equipment Manufacturing company Ltd № 1 Road, Tieling high-tech industrial development zone, Liaoning province, China. E-mail: shlensk@ukr.net

Unlike different type of fusion welding, explosion welding allows joining metals and alloys in almost any combinations, which provides the possibility of manufacturing products with a combination of service properties of the used materials at a high level of strength, tightness, fatigue strength, etc. Except of bimetals produced in fairly large volumes for chemical and oil equipment, explosion welding is used to manufacture products with special characteristics for different industries. It is possible to attribute the production of coaxial joints of different metals (welding occurs along generatrices of axisymmetric co-axial pipes), which are more complex and interesting from a scientific point of view, and more economical in practice than alternative methods of their production, as a special class of tasks. In some cases, dissimilar joint can be created by explosion crimping without welding the elements to be joined. This work presents a number of technological processes for manufacture of coaxial products developed at the PWI, using both explosion welding and crimping. The presented developments testify that a wide range of practical tasks can be solved with the help of explosion. 18 Ref., 11 Fig.

Key words: coaxial joints, explosion welding, bimetal, adapter, rod, coupling, permanent joint

Отримано 15.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 24.04.2024

Прийнято 18.07.2024

ЗАВТОМАТИЧНЕ
ЗВАРЮВАННЯ

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Передплата доступна
у друкованому та цифровому
форматах!

Підпишіться сьогодні.

Тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ НА ДОВГОТРИВАЛУ МІЦНІСТЬ ЗРАЗКІВ З ВАЖКОЗВАРЮВАНИХ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ З МІКРОПЛАЗМОВИМ ПОРОШКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

О.В. Яровицин, М.О. Черв'яков, О.О. Наконечний, О.О. Фомакін, С.О. Воронін, О.Ф. Явдошина

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

Розроблено методику високотемпературних випробувань на довготривалу міцність зварних з'єднань «основний-наплавлений метал» з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32, що містять більше 60 об'ємних % зміцнюючої γ' -фази. Вона дозволяє з використанням зразків-свідків оцінити рівень довготривалої міцності при температурах 975 та 1000 °С для умов серійного відновлення кромки робочих лопаток сучасних авіаційних газотурбінних двигунів мікроплазмовим порошковим наплавленням. При її розробці враховано необхідність виходу на більші розміри та, відповідно, вищу жорсткість зварної заготовки для виготовлення зразків для механічних випробувань порівняно з типовими умовами серійного відновлення кромки лопатки в промисловості, а також запропоновано ряд прийомів щодо запобігання гарячим тріщинам. Її особливістю є застосування для зразків з робочою частиною 7,5...9,0 мм² захватів типу «ластівчин хвіст», що дозволяє значно зменшити їх розміри. Новий підхід з вибору форми і розмірів зразка, техніки підготовки та формування необхідних для нього зварних заготовок мікроплазмовим порошковим наплавленням дозволяє суттєво зменшити тепловкладення та наблизити режими наплавлення зразків-свідків до промислових режимів серійного відновлення кромки робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів. Завдяки цьому у зварних з'єднаннях «основний-наплавлений метал» нікелевих жароміцних сплавів з направленою кристалізацією, що представляють собою заготовки для наступного виготовлення таких зразків-свідків, вдається уникнути відомих проявів схильності до утворення тріщин в процесі наплавлення та наступної термічної обробки. Розроблену методику апробовано для оцінки довготривалої міцності зразків наплавленого металу ЖС32 та зразків «50 % основного (ЖС26-ВІ або Ж32-ВІ) + 50 % наплавленого (ЖС32) металу» при 975 та 1000 °С на базі 40 год та проведено порівняння відповідних експериментальних даних з вимогами технічних умов на ці литі нікелеві жароміцні сплави. Бібліогр. 22, табл. 3, рис. 11.

Ключові слова: мікроплазмове порошкове наплавлення; зварне з'єднання «основний-наплавлений метал»; важкозварювані нікелеві жароміцні сплави; довготривала міцність

Вступ. У нас в країні в значних об'ємах виробляються та залишаються в експлуатації робочі лопатки з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів (НЖС) ЖС26 та ЖС32 (табл. 1), розрахованих на експлуатацію в сучасних авіаційних газотурбінних двигунах (ГТД) для робочих температур 950...1100 °С. На вітчизняних авіаремонтних підприємствах освоєні серійні технології відновлення бандажованих та небандажованих лопаток на базі процесу мікроплазмового порошкового наплавлення [1–4] із використанням присадного матеріалу рівноцінного рівня легування. Актуальною задачею залишається оцінка механічних властивостей таких зварних з'єднань «основний-наплавлений метал», що компенсують втрати пошкодженого матеріалу деталей в локальних зонах бандажної полиці або торця пера (рис. 1). Зокрема це стосується одного із самих важливих показників таких матеріалів – довготривалої міцності при 975 та 1000 °С [5, 6]. Одночасне поєднання двох несприятливих

факторів – більші розміри та, відповідно, вища жорсткість зварної заготовки порівняно з типовими умовами відновлення кромки лопатки в промисловості і відома висока схильність до утворення тріщин при зварюванні плавленням НЖС з високим

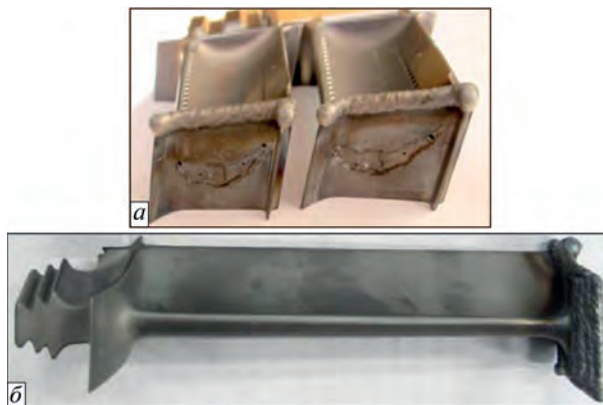


Рис. 1. Зовнішній вигляд відновлених бандажованих робочих лопаток сучасних авіаційних ГТД [3]: а – робочі лопатки турбіни високого тиску, сплав ЖС32-ВІ; б – робочі лопатки турбіни середнього тиску, сплав ЖС26-ВІ

Яровицин О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9922-3877>, Черв'яков М.О. <https://orcid.org/0000-0003-4440-7665>, Наконечний О.О. <https://orcid.org/0000-0002-6098-0413>, Фомакін О.О. <https://orcid.org/0000-0001-8903-3340>, Воронін С.О. <https://orcid.org/0009-0003-3360-2710>, Явдошина О.Ф. <https://orcid.org/0000-0002-8587-7295>
© О.В. Яровицин, М.О. Черв'яков, О.О. Наконечний, О.О. Фомакін, С.О. Воронін, О.Ф. Явдошина, 2024

Таблиця 1. Вміст основних легуючих елементів у нікелевих жароміцних сплавах

Сплав	Вар. %					
	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti
ЖС26-ВИ	0,12...0,18	4,3...5,3	Основа	8,7...9,3	5,6...6,1	0,8...1,2
ЖС32-ВИ	0,12...0,17	4,3...5,3	«-»	9,0...9,5	5,7...6,2	–
ВЖЛ12У	0,14...0,19	9,0...10,0	«-»	13,5...14,5	5,1...5,7	4,2...4,7
ЧС40	≤ 0,05	19,0...21,0	«-»	–	2,4...2,7	–

Закінчення табл. 1

Сплав	Вар. %							
	Mo	W	Nb	Ta	Re	V	Fe	Si, Mn
ЖС26-ВИ	0,8...1,4	10,9...12,5	1,4...1,8	–	–	0,8...1,2	≤ 0,5	≤ 0,3
ЖС32-ВИ	0,9...1,3	8,1...8,9	1,4...1,8	3,7...4,7	3,6...4,3	–	≤ 0,5	≤ 0,2
ВЖЛ12У	2,7...3,4	1,0...1,8	0,5...1,0	–	–	0,5...1,0	≤ 1,0	≤ 0,2
ЧС40	8,0...10,0	4,5...5,5	–	–	–	–	≤ 5,0	≤ 0,3

вмістом зміцнюючої γ' -фази вимагають створення окремих підходів для оцінки високотемпературної довготривалої міцності зазначених зварних з'єднань. Подібних публікацій інших авторів при підготовці даної статті не виявлено.

Огляд відомих стандартів на механічні випробування [7, 8] та їх аналіз [9] показують, що в них регламентуються параметри робочої ділянки зразка, а вказівки з форми і розмірів його захватної частини носять лише рекомендований характер. Витрати матеріалу на виготовлення зразка для механічних випробувань залежать від його геометричних розмірів (довжини робочої ділянки та габаритів захватної частини), а також – від необхідних припусків на його механічну обробку. Але незалежно від виду зразка для механічних випробувань (плоский, циліндричний) можна констатувати, що необхідність формоутворення його захватної частини при виготовленні значним чином збільшує габаритні розміри як безпосередньо зразка, так і відповідної вихідної заготовки.

Основними проблемами, що значно ускладнюють використання стандартних методик підготовки зварних заготовок та виготовлення з них зразків для зварного з'єднання «основний-наплавлений метал» НЖС, що імітує умови відновлення робочих лопаток авіаційних ГТД, є наступні:

1. Обмежена деформаційна здатність наплавленого металу НЖС з вмістом зміцнюючої γ' -фази більше 50 об'ємних % у стані безпосередньо після наплавлення (наприклад, за [10–12] $\epsilon_{1000^\circ\text{C}} \leq 0,7\%$) та висока схильність литого основного металу до утворення тріщин при зварюванні плавленням. Це, в свою чергу, перешкоджає виконанню бездефектного наплавлення об'ємом більше 2...3 см³ [12] через збільшення кількості тепловкладень у виріб за складовими ефективною тепловою потужності дуги та погонної енергії [13, 14].

2. Висока вартість заготовок основного металу та спеціалізованих присадних матеріалів НЖС,

необхідність їх виготовлення за індивідуальним замовленням.

3. Ускладнена механічна оброблюваність НЖС [15].

Метою даної роботи є розробка методики високотемпературних випробувань на довготривалу міцність зразків з мікроплазмовим порошковим наплавленням робочих лопаток авіаційних ГТД з важкозварюваних НЖС.

Найявний попередній позитивний досвід застосування мініатюрних плоских пропорційних зразків для випробувань на статичний розтяг при високій температурі на сервогидравлічній машині MTS-810 в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [9]. Він полягає у значному зменшенні габаритів захватної частини плоского зразка для механічних випробувань, та відповідно – об'єму, необхідного для його виготовлення зварної заготовки з НЖС, за рахунок застосування захватів-перехідників типу «ластівчин хвіст». В свою чергу, актуальними задачами в рамках розробки нової методики випробувань на високотемпературну довготривалу міцність були: розробка типового зразка та захватів-перехідників для випробувальної машини МП-3Г, а також – форми, розмірів, режимів наплавлення вихідної зварної заготовки, що гарантує її отримання без утворення тріщин.

Розробка методики досліджень. При попередньому аналізі для випробувань на високотемпературну міцність у якості вихідних прототипів було обрано 3 типи зразків. З плоского зразка, що використовується в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [16] і має захватну частину з отворами під штифт діаметром 8 мм запозичено форму робочої ділянки (довжина 25 мм, розрахунковий переріз 7,5...9,0 мм², рис. 2, а). Для уточнення необхідних геометричних характеристик захватної частини аналізувалися наступні циліндричні зразки-прототипи: діаметром 4×М6, 5×М8 та 6×М10 за ISO 6892-2:2011 [7] (рис. 2, б); близький до зразка МИ-83 [16] (рис. 2, в), що, як відомо, серійно використовується для випробувань НЖС ВЖЛ12У та ЖС6У на висо-

котемпературну довготривалу міцність. На даних зразках на основі [17] ідентифіковано геометричні характеристики поверхонь (рис. 2, б), які у різьбовому з'єднанні опираються найбільш небезпечним зусиллям зрізу [18] та зминанню: площа опору зусиллям зрізу S_{zp} та еквівалентний об'єм матеріалу V_{Σ} захватної частини зразка (табл. 2), що опирається зминанню. Визначені показники метричних різьб М6 та М8, спираючись на відомі принципи теорії подібності [19], конвертовано у необхідні розміри захватної частини плоских зразків типу

«ластівчин хвіст» (рис. 3, 4). Надалі для випробувальної машини МП-3Г виготовлено комплект спеціалізованої оснастки з НЖС ВЖЛ12У з отворами під штифт діаметром 6 мм (рис. 5), яка для встановлення плоских зразків із захватною частиною типу «ластівчин хвіст» передбачає використання проміжного захвату-перехідника.

Крім виконаних перевірочних розрахунків міцності захватної частини запропонованого зразка (див. рис. 4, а) на зріз та зминання додатково її працездатність перевірялася шляхом симуляції

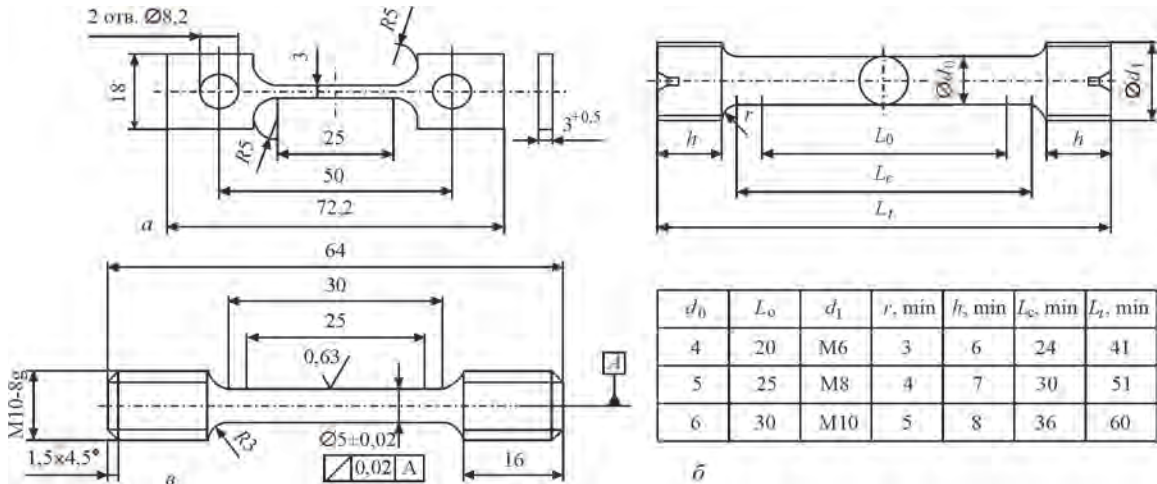


Рис. 2. Зразки-прототипи, використані для конструювання оптимізованого плоского пропорційного мініатюрного зразка під задачу випробувань зварного з'єднання «основний-наплавлений метал» НЖС на високотемпературну тривалу міцність: а – плоский пропорційний зразок ІЕЗ ім. С.О. Патона; б – циліндричний зразок за ISO 6892-2:2011 [7]; в – циліндричний зразок для випробувань НЖС ВЖЛ12У та ЖС6У

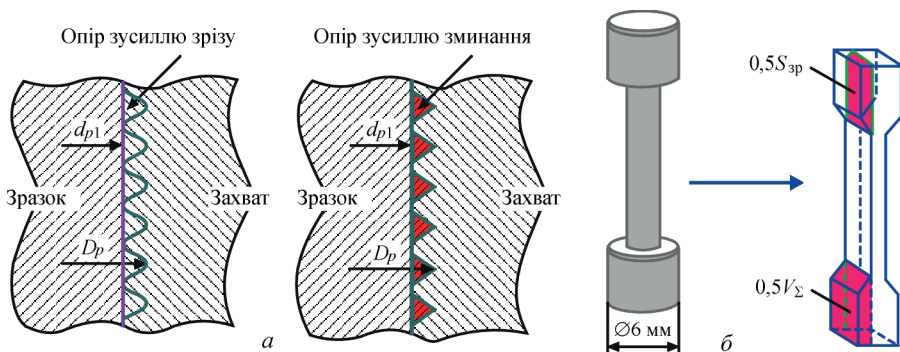


Рис. 3. Еквівалентні поверхні опору зусиллям зрізу та зминання для різьбового з'єднання зразка-прототипу (а) та схема їх конвертації в захватну частину оптимізованого плоского пропорційного зразка системи «ластівчин хвіст» (б)

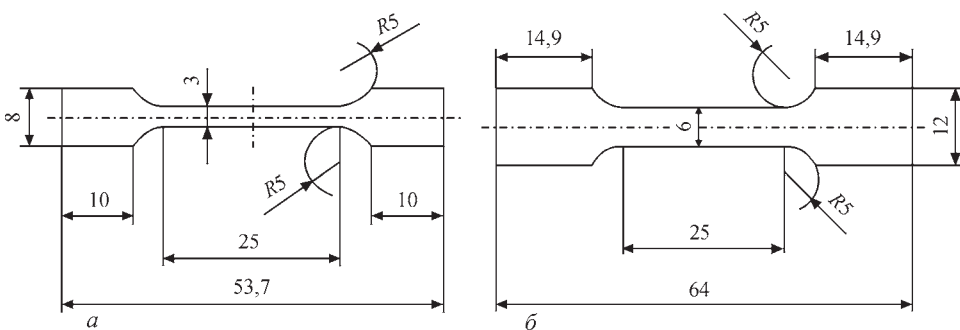


Рис. 4. Креслення розроблених оптимізованих мініатюрних плоских пропорційних зразків з захватом типу «ластівчин хвіст» для випробувань на високотемпературну тривалу міцність: а – з площею поперечного перерізу його робочої частини $S_0 = 9 \text{ мм}^2$; б – з площею поперечного перерізу його робочої частини $S_0 = 18 \text{ мм}^2$

Таблиця 2. Співвідношення базових геометричних параметрів циліндричних зразків діаметром 6×M10, 5×M8 та 4×M6 згідно ISO 6892-2:2011 з результатами розрахунків еквівалентних геометричних характеристик для плоских пропорційних зразків: S_0 – площа поперечного перерізу робочої ділянки зразка; $S_{\text{зр}}$ – площа різьби, яка опирається в захваті зусиллям зрізу; V_{Σ} – еквівалентний об’єм матеріалу, що опирається в захваті зусиллям зминання та зрізу (в різьбі або плоскому пропорційному зразку)

Циліндричний зразок								Плоский пропорційний зразок	
Тип	S_0 , мм ²	Крок різьби P , мм	Середній діаметр різьби d_2 , мм	Внутрішній діаметр різьби d_1 , мм	Кількість витків z , шт.	$S_{\text{зр}}$, мм ²	V_{Σ} , мм ³	За рис. 4 а, $S_0 = 9$ мм ²	За рис. 4 б, $S_0 = 18$ мм ²
								V_{Σ} , мм ³	
діаметр 4×M6	12,56	1	5,35	4,92	12	154,47	69,87	74,0	–
						77,35*	34,93*	37,00*	–
діаметр 5×M8	19,63	1,25	7,188	6,65	9	208,82	110,01	–	110,00
						104,41*	55,00*	–	55,00*
діаметр 6×M10	28,26	1,5	9,026	8,38	8	263,14	176,81	–	–
						131,57*	88,41*	–	–

Примітка. *для половини об’єму різьбового з’єднання або захвату типу «ластівчин хвіст».

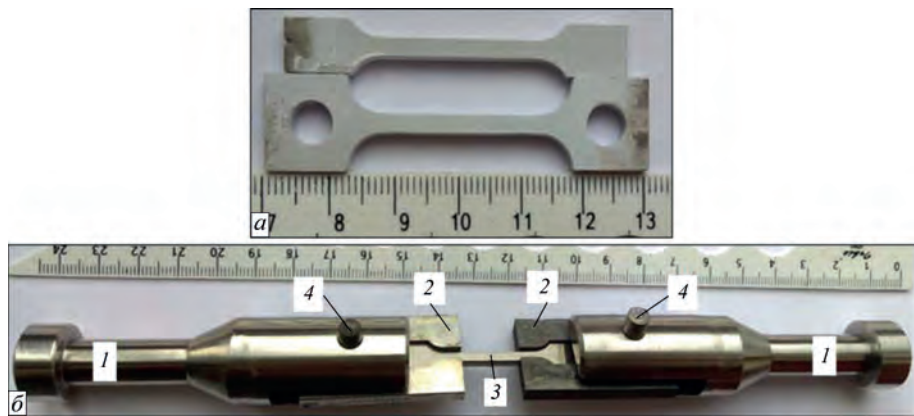


Рис. 5. Зовнішній вигляд оптимізованого плоского пропорційного в порівнянні зі зразком традиційної форми (а) та виготовлена збірка спеціалізованої оснастки для випробувальної машини МП-3Г (б). Позначення: 1 – основний захват; 2 – проміжний захват-перехідник; 3 – зразок для механічних випробувань; 4 – осі діаметром 6 мм

процесу статичного навантаження при температурі 1000 °С в програмному пакеті SOLIDWORKS Simulation 2015 відповідних 3D-моделей нового та стандартного зразка діаметром 4×M6 (рис. 5). При

цьому використовувалися довідкові дані з механічних характеристик матеріалу литого НЖС ЖС32-ВИ за [20]. Результати фізичного моделювання показали, що в запропонованому плоскому зразку

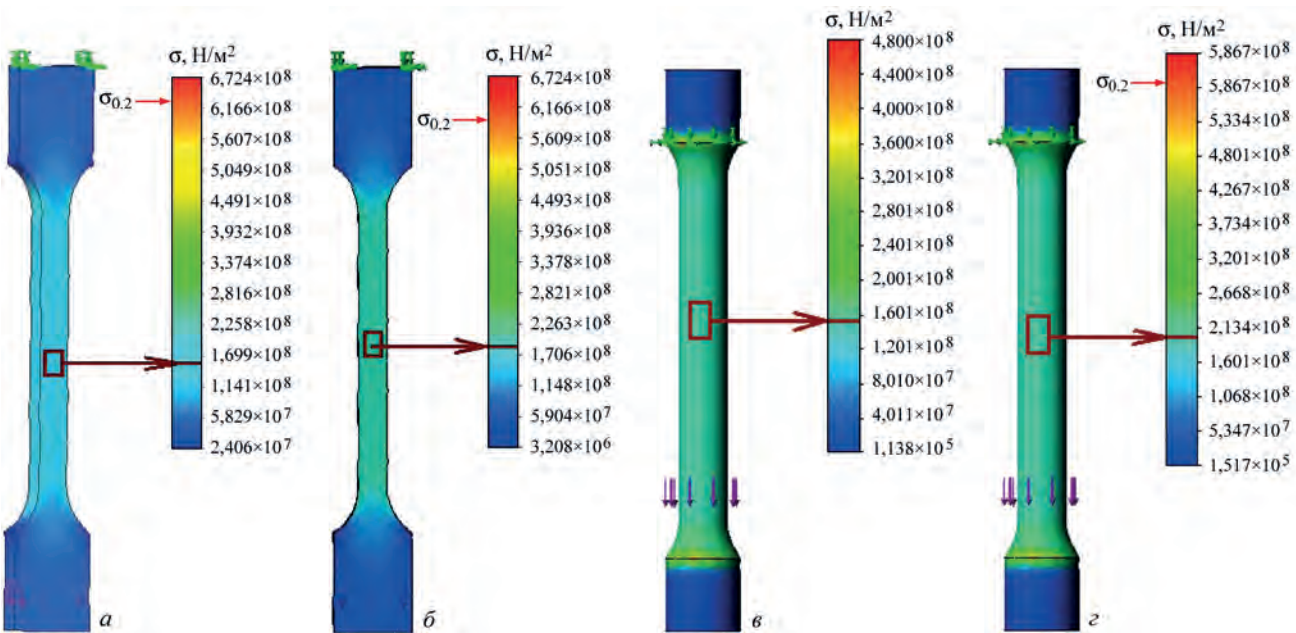


Рис. 6. Результати фізичного моделювання в програмному пакеті SOLIDWORKS Simulation 2015 3D-моделей нового (а, б) та зразка діаметром 4×M6 (в, з) з литого НЖС ЖС32-ВИ при 1000 °С

(див рис. 6, а, б) заданий рівень напружень 150 та 200 МПа безпосередньо реалізується на його робочій ділянці і ідентичний стандартному зразку діаметром 4×М6 (див рис. 5, в, г). В місцях переходу до захватної частини концентрації підвищених напружень не спостерігається.

Перевірка виготовленого комплекту оснастки для високотемпературних випробувань на довготривалу міцність зварних з'єднань важкозварюва-

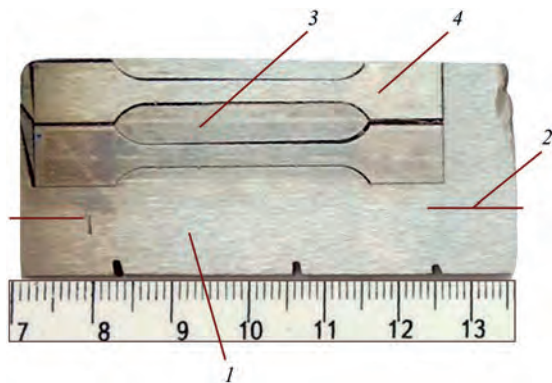


Рис. 7. Схема виготовлення оптимізованого плоского пропорційного зразка наплавленого металу для високотемпературних випробувань наплавленого металу: 1 – технологічна основа з аустенітної нержавіючої сталі; 2 – положення лінії сплавлення з наплавленим металом; 3 – наплавлений метал жаростійкого або жароміцного сплаву; 4 – оптимізований плоский пропорційний зразок

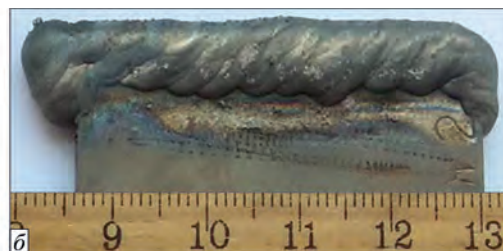
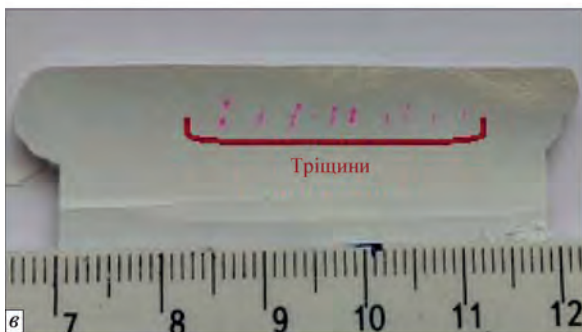
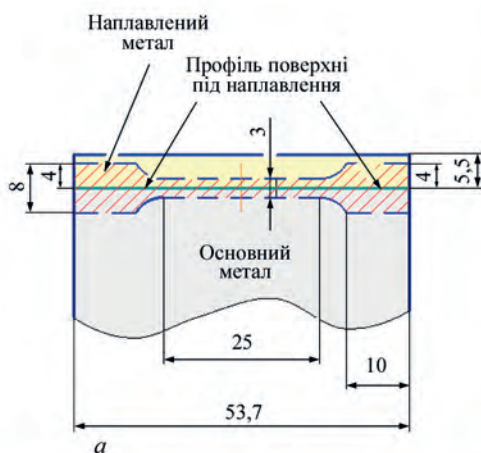


Рис. 8. Закономірності утворення тріщин в зварному з'єднанні «50 % основного (ОМ) + 50 % наплавленого (НМ) металу» НЖС типу ЖС32, виконаному одношаровим мікроплазмовим порошковим наплавленням сплаву ЖС32 з $q_{\text{н}} = 380 \dots 450$ Вт та $q_{\text{н}}/\nu = 2000 \dots 3000$ Дж/мм: а – схема підготовки зварної заготовки та вирізки зразка для механічних випробувань; б – зовнішній вид одношарового наплавлення; в – результати капілярного контролю після видалення бокових підсилень наплавленого валика; г – зовнішній вид тріщин в наплавленому металі ЖС32, виявлених при металографічному контролі

них жароміцних нікелевих сплавів здійснювалася кількома етапами при послідовному збільшенні температури випробувань та рівня жароміцності матеріалу. На першому етапі для зазначених випробувань багатошаровим наплавленням виготовлялася заготовка «вертикальна стінка», з якої після шліфування її бокових поверхонь електроерозійною різкою вирізалися оптимізовані плоскі пропорційні зразки (рис. 7). На другому етапі відпрацьовувалася підготовка зварної заготовки «50 % основного + 50 % наплавленого металу», з якої аналогічно вирізалися оптимізовані плоскі пропорційні зразки (рис. 8, 9).

Результати експериментів та їх аналіз. Умови та результати випробувань наплавленого металу ЖС40, шаруватого наплавленого металу ЖС32 + ЖС40, сформованого відповідно [21], та наплавленого металу ЖС32 представлено в табл. 3 (експерименти № 1–3). Вони підтвердили належну роботу виготовленого комплекту спеціалізованої оснастки для випробувальної машини МП-3Г: при $T = 550$ °С та $\sigma = 69$ кгс/мм² – витримка не менше 120 год; при $T = 975$ °С та $\sigma = 7,5 \dots 10,0$ кгс/мм² – витримка орієнтовно 20 год. Наступним етапом дослідних робіт було відпрацювання форми і роз-

мірів зварної заготовки для зварного з'єднання «50 % основного + 50 % наплавленого металу».

При використанні звичайного наплавлення сплаву ЖС32 на торець пластини з литого НЖС ЖС32-ВИ або ЖС26-ВИ для формування захватної частини плоского пропорційного зразка за рис. 4, а з боку наплавленого металу необхідно застосовувати одношарове наплавлення з висотою валика 6...7 мм (рис. 8, а, б). Але з'ясувалося, що такі режими мікроплазмового порошкового наплавлення на торець пластини товщиною 3,5...5,0 мм, які характеризуються діючим значенням зварювально-

го струму $I = 25 \dots 35$ А, ефективною тепловою потужністю $q_u = 350 \dots 450$ Вт та погонною енергією $q_u/v = 2000 \dots 3000$ Дж/мм, викликають утворення регулярних тріщин (рис. 8, в, г). За даними металографічного контролю 10 шліфів вони локалізуються в наплавленому металі. Їх поява пояснюється виникненням в процесі наплавлення розтягуючих деформацій, що перевищують попередньо встановлену обмежену деформаційну здатність наплавленого металу ЖС32 [11]. В свою чергу, з огляду на попередньо встановлену пряму пропорційність між величиною погонної енергії та по-

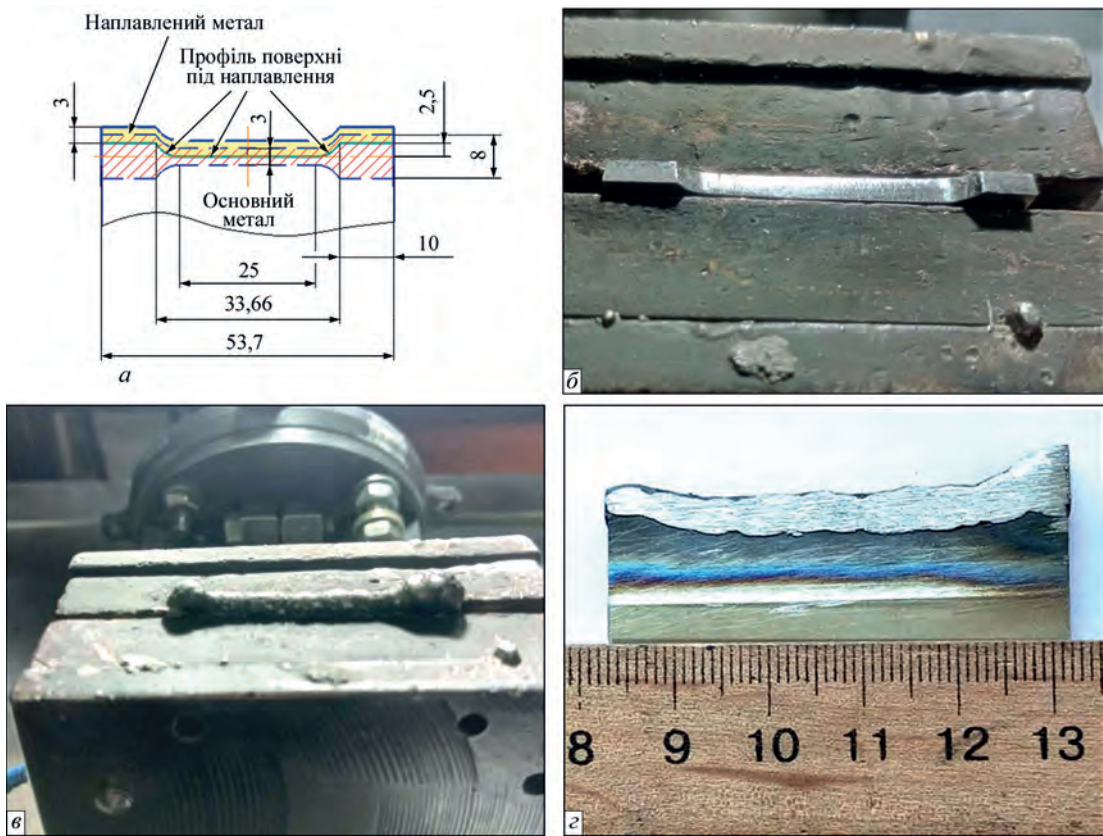


Рис. 9. Особливості підготовки поверхні та техніки наплавлення зварної заготовки для зварного з'єднання «50 % основного + 50 % наплавленого металу» НЖС: а – схема підготовки зварної заготовки та вирізки зразка для механічних випробувань; б – попереднє формування западини перед наплавленням; в – зовнішній вид одношарового наплавлення; г – зварна заготовка після часткового видалення бокових підсилень наплавленого валика

Таблиця 3. Результати випробувань на довготривалу міцність зразків зварних з'єднань мікроплазмовим порошковим наплавленням

Номер експеримента	Вид зразків	Тип зразка	Попередня термічна обробка зразка	$T, ^\circ\text{C}$	Навантаження σ , кгс/мм ²	Час витримки τ , год і хв
1	НМ ЧС40	за рис. 4, а	1050 °С – 2,5 год + 760 °С – 10 год + 650 °С – 25 год	550	69,0	120 год*
2	НМ ЖС32 + ЧС40 (Ш)	за рис. 4, б	1050 °С – 2,5 год	975	7,5	17 год 25 хв**
3	НМ ЖС32	за рис. 4, а	1050 °С – 2,5 год	975	10,0	10 год**
4	50 % ОМ ЖС32-ВИ + 50 % НМ ЖС32	за рис. 4, а	1050 °С – 2,5 год	1000	14,5	60 год**
5	50 % ОМ ЖС32-ВИ + 50 % НМ ЖС32	за рис. 4, а	1280 °С – 1,5 год	975	20,0	23 год 30 хв**
6	50 % ОМ ЖС26-ВИ + 50 % НМ ЖС32	за рис. 4, а	1265 °С – 1,5 год	975	20,0	44 год**

Примітка. *зразок знято без руйнування; **руйнування зразка по його робочій частині.

перечним перерізом наплавленого валика при мікроплазмовому порошковому наплавленні [14], їх поява може бути обумовлена збільшеними тепловкладеннями у виріб [13] через більший час існування зварювальної ванни при формуванні одношаровим наплавленням валика висотою 6...7 мм.

В той же час попереднє формування западини на поверхні торця пластини з НЖС по формі профілю робочої частини плоского пропорційного зразка (див. рис. 4, а, 9) дозволяє забезпечувати формування захватної частини з боку наплавленого металу при зниженій до 3...4 мм висоті наплавленого валика. Такі режими наплавлення порівняно з першим варіантом характеризуються погонною енергією $q_n/v = 1000...1500$ Дж/мм, що відповідно пояснюється формуванням значно меншого поперечного перерізу наплавленого валика [14]. Наступна термічна обробка такої зварної заготовки за режимами старіння $1050\text{ }^{\circ}\text{C} - 2,5$ год та гомогенізації ($1265\text{ }^{\circ}\text{C} - 1,5$ год для основного металу сплаву ЖС26-ВИ або $1280\text{ }^{\circ}\text{C} - 1,5$ год для основного металу сплаву ЖС32-ВИ) проявів в ній схильності до утворення тріщин за результата-

ми капілярного та металографічного контролю не виявила. Типовий приклад якісної мікроструктури основного та наплавленого металу в районі лінії сплавлення представлено на рис. 10. Після виготовлення електроерозійною різкою зразків для випробувань на довготривалу міцність, окіл лінії сплавлення між основним та наплавленим металом ЖС32 достатньо рівномірно припадав на середину його робочої ділянки.

Згідно відпрацьованої методики (див. рис. 4, а, 9) виконано мікроплазмове порошкове наплавлення сплавом ЖС32 3-х зварних заготовок «50 % основного + 50 % наплавленого металу» та після проходження призначеної термічної обробки, додаткового шліфування, полірування поверхонь електроерозійних різів і капілярного контролю виготовлені електроерозійною різкою зразки випробовувано на високотемпературну довготривалу міцність при 975 та $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результати випробувань представлено в табл. 3 (експерименти № 4...6). Їх інтерпретація з урахуванням попередньо отриманих в ІЕЗ ім. Є.О. Патона експериментальних даних [2] та опублікованих в роботах [6, 7] базо-

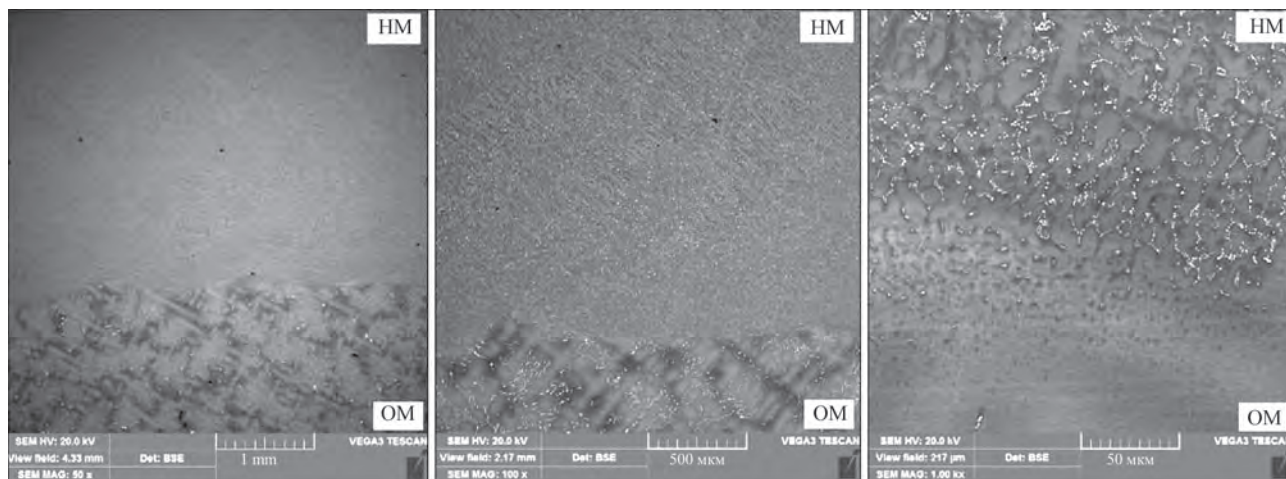


Рис. 10. Типовий приклад якісної мікроструктури зварного з'єднання «50 % основного (ОМ) + 50 % наплавленого (НМ) металу» сплаву ЖС32

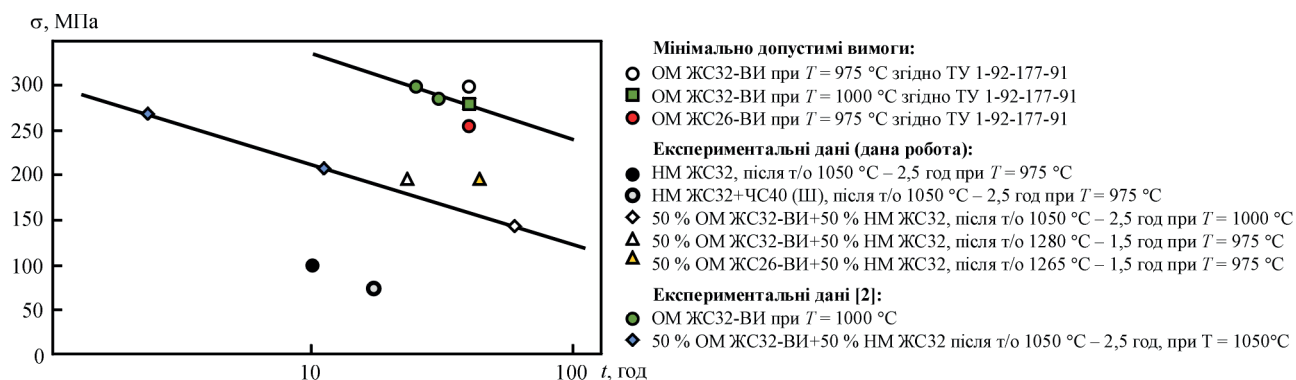


Рис. 11. Результати випробувань зразків основного металу (ОМ), наплавленого металу (НМ) та «50 % основного (ОМ) + 50 % наплавленого (НМ) металу» на тривалу міцність при температурах 975 та $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, отриманих мікроплазмовим порошковим наплавленням сплаву ЖС32, в порівнянні з вимогами діючої нормативно-технічної документації для литого металу ЖС32-ВИ та ЖС26-ВИ

вих вимог щодо мінімального рівня механічних властивостей литих НЖС ЖС32-ВИ та ЖС26-ВИ згідно ТУ 1-92-177-91 наведена на рис. 11.

Експериментальні дані випробувань на довготривалу міцність зразків «50 % основного + 50 % наплавленого металу» за участю наплавленого металу ЖС32, вирізаних вздовж лінії сплавлення з литим сплавом ЖС26-ВИ або ЖС32-ВИ, свідчать, що показники для базової довговічності 40 год відносно рівня відповідних вимог в діючих ТУ на литі сплави ЖС32-ВИ або ЖС26-ВИ [6, 7], становлять:

- для зразка «50 % основного (ЖС32-ВИ) + 50 % наплавленого (ЖС32) металу» після термічної обробки за режимом старіння 1050 °C – 2,5 год – орієнтовно 0,5 при 1000 °C;
- для зразка «50 % основного (ЖС32-ВИ) + 50 % наплавленого (ЖС32) металу» після термічної обробки за режимом гомогенізації 1280 °C – 1,5 год – орієнтовно 0,6 при 975 °C;
- для зразка «50 % основного (ЖС26-ВИ) + 50 % наплавленого (ЖС32) металу» після термічної обробки за режимом гомогенізації 1265 °C – 1,5 год – орієнтовно 0,77 при 975 °C.

Таким чином встановлено, що зварне з'єднання «основний–наплавлений метал» з висотою наплавленого шару сплаву ЖС32 до 3 мм у зоні лінії сплавлення має достатньо високі показники довготривалої міцності – на рівні 0,5...0,6 при температурах 975 та 1000 °C відносно мінімальних вимог для литого сплаву ЖС32-ВИ; на рівні 0,77 при температурі 975 °C для литого сплаву ЖС26-ВИ. Для працездатності відновлених ущільнюючих елементів робочих лопаток турбіни високого та середнього тиску (торці бандажних полиць та верхня кромка пера) із НЖС ЖС32-ВИ та ЖС26-ВИ досягається достатній рівень довготривалої міцності при температурах 975 та 1000 °C, що підтверджено практикою тривалої експлуатації відновлених робочих лопаток на сучасних авіаційних ГТД [1–4].

Аналіз отриманих авторами статті експериментальних даних та матеріалів попередньо опублікованої роботи [22] дозволяє прогнозувати наявність значного зниження показників високотемпературної довготривалої міцності в першу чергу саме для наплавленого металу ЖС32 порівняно з високотемпературною ділянкою зони термічного впливу литих жароміцних сплавів ЖС32-ВИ і ЖС26-ВИ. Припускається, що таке зниження довготривалої міцності наплавленого металу ЖС32 може бути обумовлено відмінними умовами його формування порівняно з серійною технологією лит-

тя НЖС з направленою кристалізацією, зокрема значною різницею (щонайменше на порядок [11]) у швидкостях охолодження в районі температурного інтервалу кристалізації сплавів ЖС32-ВИ і ЖС26-ВИ, яке в свою чергу істотно впливає на характеристики дендритної структури при кристалізації (див. рис. 10), а саме параметр відстані між осями дендритів. Безпосередні причини зниження властивості довготривалої міцності саме наплавленого металу ЖС32 при температурах 975 та 1000 °C потребують подальших досліджень.

Висновки

1. Розроблено методику високотемпературних випробувань на довготривалу міцність зварних з'єднань «основний–наплавлений метал» з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32, що базується на застосуванні оптимізованих мініатюрних плоских зразків з перерізом робочої частини 7,5...9,0 мм² із захватною частиною типу «ластівчин хвіст» та проміжних захватів-перехідників. При цьому за умови однакової товщини зварної заготовки витрати матеріалу порівняно із плоским зразком-прототипом зменшуються у 2...3 рази.

2. Для наплавленого металу нікелевих високожароміцних сплавів, що має обмежену деформаційну здатність в процесі багатошарового наплавлення, запропонована методика дозволяє отримувати зразки без дефектів та гарантує високу достовірність відповідних експериментальних даних.

3. Запропоновано, з метою запобігання утворенню тріщин, при підготовці зварної заготовки «50 % основного + 50 % наплавленого металу» високожароміцного нікелевого сплаву, попередньо виконувати на торцевій поверхні пластини товщиною 3,5...5,0 мм виборку-заглиблення на 2,5...3,0 мм. Це дозволяє обмежувати висоту наплавленого валика до 3...4 мм і, за рахунок зменшення його поперечного перерізу та кількості наплавленого матеріалу, обмежувати при ефективній потужності мікроплазмової дуги 350...450 Вт її погонну енергію до 1000...1500 Дж/мм шляхом збільшення швидкості мікроплазмового порошкового наплавлення.

4. Апробацію розробленої методики проведено при випробуванні зразків наплавленого металу та зразків «основний–наплавлений метал» вздовж лінії сплавлення: при 550 °C – на базі 100 год; при 975 та 1000 °C – на базі 40 год.

5. Встановлено, що зварне з'єднання «основний–наплавлений метал» за участю наплавленого металу ЖС32, що також включає високотемпературну ділянку зони термічного впливу

основного металу, має наступні показники довготривалої міцності на базі 40 год порівняно з мінімально допустимими за ТУ для литого нікелевого жароміцного сплаву: на рівні 0,5...0,6 при температурах 975 та 1000 °С відносно литого сплаву ЖС32-ВІ; на рівні 0,77 при температурі 975 °С відносно литого сплаву ЖС26-ВІ.

6. Працездатність зварного з'єднання «основний–наплавлений метал» НЖС типу ЖС32 при визначеному в даній роботі рівні довготривалої міцності підтверджено практикою експлуатації протягом заданого міжремонтного періоду великої кількості моторокомплектів робочих лопаток турбіни високого та середнього тиску сучасних авіаційних ГТД, відновлених українською авіаційною промисловістю з 2005 р.

Список літератури

1. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Калашников Г.П. и др. (2005) Ремонт изношенных в процессе эксплуатации элементов конструкции бандажных полок литых рабочих лопаток турбины из сплавов типа ЖС. *Авиационно-космическая техника и технология*, **9** (25), 221–223.
2. Ющенко К.А., Савченко В.С., Яровицын А.В. и др. (2010) Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д-18Т методом микроплазменной порошковой наплавки. *Автомат. сварка*, **8**, 25–29.
3. Жеманюк П.Д., Петрик И.А., Чигилейчик С.Л. (2015) Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. *Автомат. сварка*, **8**, 43–46.
4. Ющенко К.А., Яровицын О.В., Хрущов Г.Д. и др. (2022) Дослідження та оптимізація серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням. *Космічна наука і технологія*, **3**(28), 3–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.01-01>
5. Жеманюк П.Д., Клочихин В.В., Лысенко Н.А., Наумик В.В. (2015) Структура и свойства литых лопаток авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВІ после горячего изостатического прессования. *Вестник двигателестроения*, **1**, 139–146.
6. Милонин Е.В., Лысенко Н.А., Наумик В.В. (2016) Направленная кристаллизация литых изделий из опытного жаропрочного сплава на базе ЖС32-ВІ. *Авиационно-космическая техника и технология*, **8**, 83–89.
7. ISO 6892-2:2011 (E). *Metallic materials – Tensile testing – Part 2: Method of test at elevated temperature*. ISO copyright office, 2011.
8. EN ISO 204-2018 *Metallic materials – Uniaxial creep testing in tension – Method of test*. ISO copyright office, 2018.
9. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. и др. (2019) Оценка кратковременных механических свойств соединения трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6. *Автомат. сварка*, **7**, 38–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.07>
10. Ющенко К.А., Звягінцева Г.В., Яровицын О.В. та ін. (2019) Нові підходи в оцінці механічних характеристик та мікроструктури відновлених деталей ГТД із нікелевих жароміцних сплавів. *Металофізика та новітні технології*, **10**(41), 1345–1364. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345>
11. Яровицын О.В. (2020) Оцінка деформаційної здатності наплавленого металу нікелевих жароміцних сплавів з високим вмістом γ'-фази. *Металознавство та обробка металів*, **26**(94), 38–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.38>

12. Ющенко К.А., Яровицын О.В., Наконечный О.О. та ін. (2020) Розробка технології відновлення сектора соплових лопаток з важкозварюваного нікелевого жароміцного сплаву типу ЖС6 мікроплазмовим порошковим наплавленням. *Автомат. зварювання*, **11**, 27–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2020.11.05>
13. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. (2017) Влияние энергетических показателей режимов на склонность к образованию трещин при микроплазменной порошковой наплавке никелевого сплава ЖС32. *Автомат. сварка*, **2**, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.02.01>
14. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. (2016) Закономерности дискретно-аддитивного формирования микрообъемов кристаллизующегося металла при многослойной микроплазменной порошковой наплавке никелевых сплавов. *Автомат. сварка*, **5-6**, 154–161. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.06.25>
15. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. (2003) *Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. Монография*. Запорожье, ОАО «Мотор Сич».
16. (1978) *Каталог образцов для испытаний металлов*. ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР.
17. ДСТУ ISO 724:2005 *Нарізі метричні ISO загального призначення. Основні розміри* (ISO 724:1993, IDT), 2007.
18. Биргер И.А., Шор Б.Ф., Иосилевич Г.Б. (1979) *Расчет на прочность деталей машин. Справочник. 3-е издание*. Москва, Машиностроение.
19. Гухман А.А. (1973) *Введение в теорию подобия*. Москва, Машиностроение.
20. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Конакова И.П. (2010) *Структура и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВІ. Справочник*. Екатеринбург, Квист.
21. Ющенко К.А., Яровицын О.В., Наконечный О.О. та ін. (2023) *Спосіб мікроплазмового порошкового 3D-наплавлення деталей з нікелевих жароміцних сплавів*. Патент UA 127421. Опубл. 16.08.2023.
22. Ющенко К.А., Яровицын О.В., Червяков Н.О. та ін. (2022) Формування комплексу вимог до методик оцінювання роботоздатності зварних з'єднань «основний–наплавлений метал» нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС6 і ЖС32, що імітують відновлення кромок лопаток авіаційних ГТД в промислових умовах. *Металофізика та новітні технології*, **12**(44), 1679–1696. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.12.1679>

References

1. Peychev, G.I., Zamkovoy, V.E., Kalashnikov, G.P. et al. (2005) Repair of structural elements worn out in the process of operation of the truss shelves of cast working blades of the turbine made of alloys of the ZS type. *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, **9**(25), 221–223 [in Russian].
2. Yushchenko, K.A., Savchenko, V.S., Yarovytsyn, A.V. et al. (2010) Development of the technology for repair microplasma powder cladding of flange platform faces of aircraft engine high-pressure turbine blades. *The Paton Welding J.*, **8**, 21–24.
3. Zhemanyuk, P.D., Petrik, I.A., Chigileychik, S.L. (2015) Experience of introduction of the technology of reconditioning microplasma powder surfacing at repair of high-pressure turbine blades in batch production. *The Paton Welding J.*, **8**, 43–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.08.08>
4. Yushchenko, K. A., Yarovytsyn, O. V., Khrushchov, G. D. et al. (2022) Research and optimization of refurbishment of HPT blades of the D-18T aircraft gas turbine engine by microplasma powder welding. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, **3**(28), 3–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.01-01> [in Ukrainian].
5. Zhemanyuk, P., Klochyhyn, V., Lysenko, N., Naumyk, V. (2015) Structure and properties of cast aircraft engines blades (HA26-VI alloy) from heatproof nickeliferous alloy after hot isostatic pressing. *Vestnik Dvigatelistroeniya*, **1**, 139–146 [in Russian].

6. Milonin, E. V., Lysenko, N. A., Naumyk, V. V. (2016) Directional solidification cast products of experienced superalloy base HA32-VI, *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, 8, 83-89 [in Russian].
7. (2011) ISO 6892-2:2011 (E) *Metallic materials – Tensile testing – Pt 2: Method of test at elevated temperature*.
8. (2018) EN ISO 204-2018 *Metallic materials – Uniaxial creep testing in tension – Method of test*.
9. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, A.V., Chervyakov, N.O. et al. (2019) Evaluation of short-term mechanical properties of a joint of difficult-to-weld nickel high-temperature alloys of ZhS6 type. *The Paton Welding J.*, 7, 29-35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.07.07>
10. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Chervyakov, M. O. et al. (2019) New approaches in evaluation of mechanical characteristics and microstructure of restored parts of GTE from nickel heat-resistant alloys. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 10(41), 1345-1364. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345> [in Ukrainian].
11. Yarovytsyn, O.V. (2020) About the deformation ability of overlay metal of nickel-base difficult to weld high temperature strength alloys with γ' -phase strengthening high content. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 26(94), 38-48. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.38> [in Ukrainian].
12. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Nakonechnyi, O.O. et al. (2020) Development of the technology of reconditioning the sealing element of nozzle blade sector from difficult-to-weld high-temperature nickel alloy of ZhS6 type by microplasma powder surfacing. *The Paton Welding J.*, 11, 25-28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.11.05>
13. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, A.V., Chervyakov, N.O. (2017) Effect of energy parameters of microplasma powder surfacing modes on susceptibility of nickel alloy ZhS32 to crack formation. *The Paton Welding J.*, 2, 2-6. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2017.02.01>
14. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, A.V., Chervyakov, N.O. (2016) Dependencies of discrete-additive formation of microvolumes of metal being solidified in multi-layer microplasma powder surfacing of nickel alloys. *The Paton Welding J.*, B, 143-149. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2016.06.25>
15. Bohuslaev, V.A., Muravchenko, V.M., Zhemanyuk, P.D. et al. (2003) Technological support of service characteristics of GTE parts. In: *Turbine blades. Pt. 2*. Zaporozhie: OJSC Motor Sich Publish. House, [in Russian].
16. (1978) *Metal Test Specimen Catalog*. PWI of the Academy of Sci. of the Ukr.SSR [in Russian]
17. DSTU ISO 724:2005 ISO *Metric threads of general purpose. Basic dimensions* (ISO 724:1993, IDT), 2007 [in Ukrainian].
18. Birger, I.A., Shor, B.F., Iosilevich, G.B. (1979) *Strength calculation of machine parts: Refer. book. 3rd ed.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
19. Gukhman, A. A. (1973) *Introduction to the theory of similarity*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
20. Kuznetsov, V.P., Lesnikov, V.P., Konakova, I.P. (2010) *Structure and properties of heat-resistant nickel alloy ZhS32-VI: Refer. book*. Ekaterinburg, Kvist [in Russian].
21. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Nakonechnyi, O.O., Khrushchov G.D. et al. *The method of microplasma powder 3D deposition of parts made of nickel-based superalloys*. Patent UA 127421, B23K 10/02, B23K9/04, B23K9/23, B23K6/00, Publ. 16.08.2023 [in Ukrainian].
22. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Chervyakov, M. O. (2022) Development of a set of requirements of methods for evaluating the performance of welded joints “base-overlay metal” from nickel-based superalloys of ZhS6 and ZhS32 type, simulating the repairing of the aircraft gas turbine engines blade edges under industrial conditions. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 12(44), 1679-1696. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.12.1679> [in Ukrainian]

HIGH-TEMPERATURE CREEP TESTING OF DIFFICULT-TO-WELD NICKEL-BASED SUPERALLOY SAMPLES WITH MICRO-PLASMA POWDER DEPOSITION

O.V. Yarovytsyn, M.O. Chervyakov, O.O. Nakonechnyi, O.O. Fomakin, S.O. Voronin, O.F. Yavdoshchina

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

E-mail: yarovytsyn@gmail.com

The procedure of high-temperature uniaxial creep testing for welded joints of “base-deposited metal” made of difficult-to-weld nickel-based superalloys of ZhS32 type, containing more than 60 vol. % of the strengthening γ' -phase, has been developed. It allows using witness samples to estimate the creep strength level at temperatures of 975 and 1000°C for the conditions of restoration of the edges of serial blades of modern aircraft gas turbine engines by micro-plasma powder welding deposition process. Its development took into account the need to go to larger sizes and, accordingly, the higher restraint conditions of the welded workpieces for manufacture of samples for mechanical tests, compared to typical conditions of serial restoration of the blade edge in industry, and some methods for hot cracks prevention were also proposed. Its feature is the use of “dovetail” type grips for samples with the working part of 7.5-9.0 mm², which allows significantly reducing their size. The proposed approach of choosing the shape and dimensions of the sample, the technique of preparing and forming the welded workpieces necessary for it by micro-plasma powder deposition allows significantly reducing the heat input, bringing the deposition modes of the witness samples closer to the industrial modes of serial restoration of the edges of blades of aircraft gas turbine engines. Due to that, it was possible to avoid the known manifestations of the tendency to crack formation during the deposition process and post weld heat treatment in the welded joints of the “base-deposited metal” of the nickel-based superalloys with directional crystallization, which are the workpieces for subsequent production of such witness samples. The developed procedure was tested to evaluate the creep strength of ZhS32 deposited metal samples and “50% base (ZhS26-VI or ZhS32-VI) + 50% deposited (ZhS32) metal” samples at 975°C and 1000°C on the base of 40 hours holding and comparison of the relevant experimental data with the technical condition requirements for these cast nickel-based superalloys. 22 Ref., 3 Tabl., 11 Fig.

Keywords: micro-plasma powder welding deposition, welded joint of “base-deposited metal”, difficult-to-weld nickel-based superalloys, creep strength

Отримано 04.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 18.05.2024

Прийнято 08.07.2024

ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ З ШИХТОЮ У ВИГЛЯДІ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПОРОШКУ

І.О. Рябцев¹, А.А. Бабінець¹, І.П. Лентюгов¹, Е. Нягай², А. Чуприньски³

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

²Верхньосілезький технологічний Інститут. E-mail: Jerzy.Niagaj@git.lukasiewicz.gov.pl

³Сілезький політехнічний інститут. E-mail: artur.czuprynski@polsl.pl

Проведені порівняльні експериментальні дослідження впливу типу та гранулометричного складу вихідних металічних гранульованих матеріалів, які використовувались у якості шихти порошкового дроту, на його зварюально-технологічні властивості при напавленні під флюсом. В якості шихти для дослідних дротів використовували порошок швидкорізальної сталі ПГ-Р6М5 грануляцією 50...300 та 200...250 мкм, отриманий методом розпилення металевого розплаву. Еталоном слугував порошковий дріт, шихта якого складається із феросплавів грануляцією 50...300 мкм, розрахований для забезпечення аналогічного хімічного складу напавленого металу та виготовлений за стандартною технологією. Експериментально визначено, що зварюально-технологічні характеристики дротів трьох типів знаходяться на високому рівні, при цьому процес напавлення порошковими дросами, шихта яких містить гранульований порошок ПГ-Р6М5, характеризується більшою стабільністю, що позначається на збільшенні коефіцієнтів розплавлення та напавлення, та зниженні коефіцієнта втрат у порівнянні із дросом-аналогом з шихтою із порошків феросплавів. Визначено також, що вміст шкідливих домішок в зразку, напавленому дослідними дросами із шихтою з гранульованих порошків, нижче ніж у зразку-еталоні. Відзначені вище закономірності свідчать про те, що використання гранульованого порошку в шихті порошкових дротів не тільки технічно можливо, а й приводить до підвищення однорідності порошкового дроту, що позитивно впливає на його зварюально-технологічні властивості. Бібліогр. 18, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: дугове напавлення, порошковий дріт, шихта порошкового дроту, гранулометричний склад порошків, феросплави, зварюально-технологічні властивості, напавлений метал, стабільність напавлення, металургійна спадковість

Вступ. Широко відомо, що експлуатаційні властивості напавлених деталей, в першу чергу, визначаються хімічним складом та структурою металу напавленого шару, тому для їх підвищення зазвичай використовують метод комплексного легування останнього [1–7]. Проте на сьогоднішній день технічні та економічні можливості такого підходу практично вичерпані. Крім того, легування напавленого металу для більшості способів напавлення, здійснюється за рахунок електродних або присадних матеріалів, в шихті яких, в основному, використовуються феросплави, що досить суттєво забруднені небажаними домішками.

Вміст небажаних і навіть шкідливих домішок у феросплавах може бути в 2...5 разів більше, ніж в порошках чистих металів. Наприклад, об'ємна доля домішок у феромарганці може досягати 0,4 %, у феротитані – 0,6 %, у феросиліції – 1,0 %. Одним з основних забруднюючих компонентів у феросплавах є сірка, вміст якої у високовуглецевому ферохромі складає до 0,08 %; у феротитані – до 0,1 %; у феромолібдені та феровольфрамі – до 0,2 %. При цьому вміст домішок у порошках чистих металів і сплавів, які виготовляють шляхом

розпилення металевого розплаву, значно нижчий. Зокрема, у гранульованому порошок марки ПГ-Р6М5 вміст сірки не перевищує 0,03 % [8–10].

Більшість небажаних домішок при дуговому напавленні переходять із феросплавів в напавлений метал, викликаючи тим самим певну негативну металургійну спадковість, та можуть погіршувати механічні та експлуатаційні властивості напавленого металу. У зв'язку з цим при напавленні або зварюванні існує багато хімічних та технологічних способів боротьби із шкідливими домішками для підвищення зварюально-технологічних властивостей порошкових дротів та експлуатаційних властивостей напавленого ними металу [11–13].

У роботах [14–16] показано, що використання гранульованих матеріалів певних типів, отриманих шляхом розпилення металевого розплаву, в якості шихти порошкових дротів дозволяє отримати більшу рівномірність заповнення порошкового дроту та покращити стабільність дугового процесу та, як наслідок, підвищити якість формування напавленого металу та понизити вміст шкідливих домішок, що позитивно позначається на його експлуатаційних властивостях.

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>, Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>, Нягай Е. – <https://orcid.org/0009-0001-6831-1548>, Чуприньски А. – <https://orcid.org/0000-0001-9337-8325>

© І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, Е. Нягай, А. Чуприньски, 2024

Мета роботи полягає у порівняльному дослідженні впливу типу та гранулометричного складу гранульованих порошків швидкорізальної сталі Р6М5, які використовувались у якості шихти порошкових електродних дротів замість композиції із феросплавів, на його зварювально-технологічні властивості та якість формування наплавленого металу при електродуговому наплавленні.

Матеріали та методики досліджень. Для електродугового наплавлення дослідних зразків було виготовлено три партії дослідних порошкових електродних дротів із складом шихти трьох різних типів, які забезпечують отримання наплавленого металу однакового хімічного складу – інструментальної низьколегованої сталі 30В2ХМФ. Для цього було розраховано склад відповідних дротів, коефіцієнт заповнення яких складав ~ 30 %, діаметр – 2,0 мм. Конструкція дротів – трубчаста з перекриттям країв.

В якості шихти для дроту № 1 був обраний гранульований порошок марки ПГ-Р6М5, грануляція порошку стандартна – 50...300 мкм. У шихті дроту № 2 використовували такий же порошок, однак його гранулометричний склад було обмежено більш вузькими межами – 200...250 мкм. Також було розраховано склад та виготовлено порошковий дріт № 3, який би забезпечував отримання наплавленого металу аналогічного хімічного складу до дротів № 1 та 2, проте шихта якого складалась із феросплавів стандартної грануляції – 50...300 мкм [11]. Визначення та обмеження гранулометричного складу порошків виконували за допомогою ситового аналізу.

Наплавлення виконували автоматичним дуговим способом під шаром флюсу АН-26 на однакових режимах: швидкість подачі дроту – 120 м/год, що відповідало силі струму ~ 200 А, напрузі – 30 В, швидкості наплавлення – 18 м/год. Попередньо зразки підігрівали до температури 280...300 °С для уникнення гарячих тріщин.

З метою уникнення впливу перемішування наплавленого металу з основним (сталь S235 за EN 10025-2), наплавлення кожного зразка виконували в п'ять шарів. Визначення хімічного складу, який здійснювали спектральним методом, та твердості металу виконували в п'ятому наплавленому шарі кожного зразка після його шліфування.

Зварювально-технологічні властивості дослідних дротів оцінювали за такими параметрами:

- характер збудження дуги (легкий, середній, ускладнений);
- стабільність горіння дуги (стабільне, задовільне, нестабільне);
- якість формування наплавленого валика (якісне, задовільне, неякісне);
- якість відділення шлакової кірки (легке, задовільне, ускладнене);
- тип та наявність дефектів в наплавленому металі (відсутні, поодинокі, значна кількість);
- характеристики плавлення (коефіцієнти розплавлення, наплавлення, втрат).

Для розрахунку коефіцієнтів розплавлення (α_p), наплавлення (α_n) та втрат (ψ) на вигар та розбризкування визначали масу пластин та дротів перед наплавленням та після нього, а також фіксували час наплавлення. Відповідні коефіцієнти визначали, використовуючи широковідомі вирази:

$$\alpha_p = G_p / (I \cdot t), \tag{1}$$

$$\alpha_n = G_n / (I \cdot t), \tag{2}$$

$$\psi = ((\alpha_p - \alpha_n) / \alpha_p) \cdot 100 \% \tag{3}$$

де G_p – маса розплавленого металу, г; G_n – маса наплавленого металу, г; I – зварювальний струм, А; t – час наплавлення, год.

Окрім візуальної, оцінку стабільності дугового процесу виконували, аналізуючи інтегральні величини, які визначають його енергетичний стан, такі як, наприклад, напруга та струм дуги при багаторазовій їх фіксації [17]. Згідно з методикою, аналізували відхилення від середнього поточних значень величин струму та напруги на дузі за розрахованими коефіцієнтами варіації. Параметри режиму протягом процесу наплавлення фіксували за допомогою цифрового записуючого мультиметра ANENG AN9002, оснащеного високошвидкісним аналого-цифровим перетворювачем.

Результати досліджень та їх обговорення. Візуально метал, наплавлений всіма типами дослідних дротів, має однаково високу якість формування, дефекти відсутні, якість відділення шлакової кірки – задовільна (рис. 1). Результати спектрального аналізу та вимірювання твердості наплавленого металу показали (табл. 1), що метал, наплавлений дослідними дротами трьох типів, має

Таблиця 1. Хімічний склад та твердість металу, наплавленого дослідними дротами

Номер	Вміст хімічних елементів в наплавленому металі, %									Твердість, HRC
	C	Cr	Mo	W	V	Mn	Si	S	P	
1	0,19	1,2	1,64	1,70	0,50	0,3	0,56	0,020	0,022	30...32
2	0,19	1,2	1,71	1,74	0,51	0,3	0,56	0,021	0,024	29...31
3	0,25	1,38	1,27	1,63	0,35	0,38	0,73	0,027	0,037	28...32
*	0,2...0,3	1,0...1,4	1,0...1,7	1,5...2,0	0,3...0,5	0,3...0,5	0,3...0,5	≤0,04	≤0,04	30...35

Примітка. *Дано розрахунковий склад та твердість наплавленого металу.



Рис. 1. Зовнішній вид зразків, наплавлених дротами № 1–3 в п’ять шарів (а) та їх поперечні макрошліфи (б)

практично однаковий хімічний склад та твердість, що забезпечує отримання наплавленого металу типу низьколегованої інструментальної сталі 30B2XMФ. Слід відзначити дещо меншу, у порівнянні з шихтою із феросплавів, забрудненість сіркою та фосфором металу, наплавленого дротами з шихтою із порошку з чистих металів. Це пояснюється меншим вмістом цих елементів у порошках швидкорізальної сталі Р6М5.

Порівняльна оцінка зварювально-технологічних властивостей дослідних дротів (табл. 2) показала, що вони знаходяться приблизно на однаковому рівні, проте дроти № 1 та 2 із шихтою, яка складається із гранульованого порошку марки ПГ-Р6М5, мають в 1,2...1,3 рази вищі коефіцієнти розплавлення та наплавлення у порівнянні із дротом-аналогом з шихтою із феросплавів. Так само, дроти № 1 та 2 мають нижчий у 2,9...4,2 рази коефіцієнт втрат при наплавленні у порівнянні із дротом-аналогом.

Аналіз даних по величині струму та напруги, отриманих під час наплавлення дослідними дро-

тами показав (табл. 3), що найбільш стабільним є процес наплавлення дротом № 1 – він характеризується найменшим діапазоном відхилення значень від середнього по величині струму та напруги. Найменшою стабільністю характеризується процес наплавлення дротом-аналогом № 3, з шихтою із феросплавів, що, очевидно, може бути пояснено тим, що кінетика перебігу процесу плавлення порошкового дроту, в якому містяться компоненти однакового складу та типу (гранульований порошок ПГ-Р6М5), а також мають ідентичні фізичні властивості, (густина, температура плавлення, електропровідність тощо) буде характеризуватися

Таблиця 3. Порівняльна оцінка стабільності процесу дугового наплавлення дослідними дротами

Параметр	Марка дроту		
	№ 1	№ 2	№ 3
Задана величина напруги, В	28,0		
Мінімальне значення напруги, В	26,03	25,91	25,27
Максимальне значення напруги, В	32,39	32,72	36,41
Середнє значення напруги, В	29,45	29,19	29,46
Діапазон відхилення по напрузі, В	-1,97/+1,45	-2,09/+4,72	-2,73/+8,41
Коефіцієнт варіації по напрузі на дузі K_u , %	4,72	4,99	6,07
Задана величина струму, А	200,0		
Мінімальне значення струму, А	136,4	127,8	128,6
Максимальне значення струму, А	252,0	266,0	312,0
Середнє значення струму, А	194,8	194,9	214,6
Діапазон відхилення по струму, А	-63,6/+52,0	-72,2/+66,0	-71,4/+112,0
Коефіцієнт варіації по струму K_I , %	14,12	14,71	16,18

Таблиця 2. Порівняльна оцінка зварювально-технологічних властивостей дослідних дротів

Параметр	Тип дроту		
	№ 1	№ 2	№ 3
Характер збудження дуги	легкий	легкий	легкий
Стабільність горіння дуги	стабільне	стабільне	стабільне
Якість формування наплавленого валика	якісне	якісне	якісне
Якість відділення шлакової кірки	задовільне	задовільне	задовільне
Наявність видимих дефектів (пори, тріщини, несплавлення і т.п.)	немає	немає	немає
Коефіцієнти, %:			
– розплавлення α_p	17,1	16,2	13,6
– наплавлення α_n	16,8	15,8	12,6
– втрат ψ	1,75	2,47	7,35

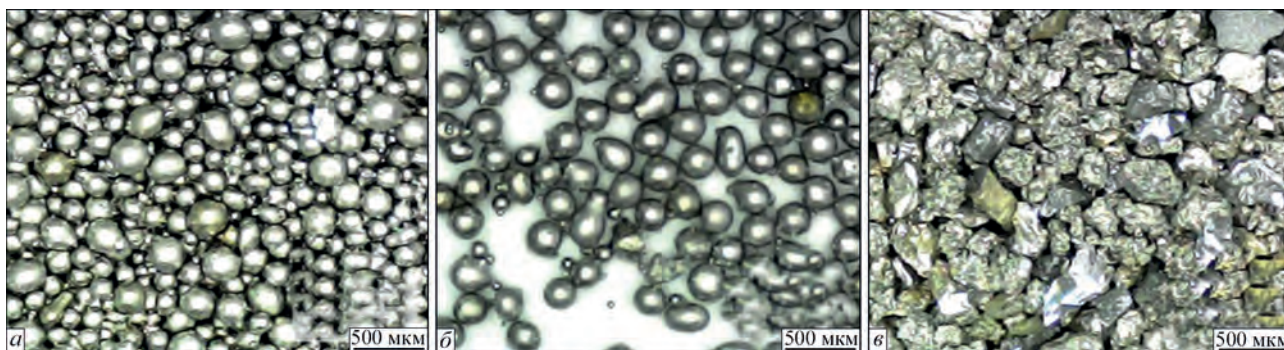


Рис. 2. Зовнішній вигляд зразків шихти з порошку Р6М5 грануляцією 50...300 мкм (а) та 200...250 (б), а також феросплавів грануляцією 50...300 мкм (в)

більшою стабільністю у порівнянні з кінетикою плавлення дроту, в шихті якого знаходяться феросплави та інші компоненти, в яких ці характеристики різняться [18].

Дещо вищі зварювально-технологічні властивості дроту № 1 у порівнянні з дротом № 2 (обидва мають шихту з гранульованого порошку Р6М5) може бути пояснено, на нашу думку, різницею у гранулометричному складі використаних порошків. У дроті № 1 використовувались порошки, які складаються з глобулярних частинок розміром 50...300 мкм, а в дроті № 2 – ті ж частинки, але розміром 200...250 мкм (рис. 2).

Очевидно, що при застосуванні для шихти дроту компонентів майже однакового, досить великого розміру (200...250 мкм), під час виготовлення дроту між компонентами утворюються пустоти, що може впливати на кінетику плавлення порошкового електродного дроту. При використанні в шихті порошків з широким діапазоном гранулометричного складу – від 50 до 300 мкм – таких пустот у шихті утворюється значно менше, що пов'язано з більш високою щільністю та однорідністю порошкового дроту, який плавиться більш стабільно.

Висновки

1. Комплексним порівняльним дослідженням зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для дугового наплавлення, в шихті яких використано матеріали двох різних типів – гранульовані порошки та феросплави, встановлено, що використання в шихті порошкових дротів гранульованих матеріалів забезпечує отримання більш високих зварювально-технологічних властивостей, підвищення стабільності процесу дугового наплавлення, якості формування наплавленого металу та зниження в ньому вмісту шкідливих домішок сірки та фосфору.

2. Експериментально визначено, що тип вихідних шихтових компонентів та їх гранулометричний склад мають значний вплив на стабільність

перебігу процесу дугового наплавлення, а отже, можуть позначитись на структурі й експлуатаційних властивостях наплавленого металу.

Список літератури/References

1. Bely, A.I., Zhudra, A.P., Dzykovich V.I. (2002) Effect of alloying elements on structure of composite alloy based on tungsten carbides. *The Paton Welding J.*, **11**, 17–19.
2. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kyiv, Ekotekhnologiya. ISBN 978-966-8409-31-8 [in Russian].
3. Ryabtsev, I., Fomichov, S., Kuznetsov, V. et al. (2023) *Surfacing and additive technologies in welded fabrication*. Switzerland, Springer Nature AG. ISBN 978-3-031-34390-2.
4. Guk, V.A. (2000) Materials and technology for surfacing of machine parts operating under conditions of impact-abrasive wear. *The Paton Welding J.*, **8**, 11–13.
5. Skulsky, V.Yu. (2006) Effect of the degree of alloying of heat-resistant chromium steels on hardness of metal within the welded joint zone. *The Paton Welding J.*, **9**, 17–20.
6. Czupryński, A. (2020) Comparison of properties of hardfaced layers made by a metal-core-covered tubular electrode with a special chemical composition. *Materials*, **13**(23):5445. <https://doi.org/10.3390/ma13235445>.
7. Niagaj, J. (2011) Effect of niobium on properties of hardfaced layers surface welded by Fe–Cr–C open arc flux-cored wire electrodes. *Przegląd Spawalnictwa*, **10**, 67–72.
8. Gasik, M., Dashevskii, V., Bizhanov, A. (2020) *Ferroalloys: Theory and Practice*. Switzerland, Springer Nature. ISBN 978-3-030-57501-4.
9. Kucher, I.G., Ol'shanskiy, V.I., Filippov, I.I., Kucher, I.I. (2020) *Ferroalloy Manufacturer's Handbook*. Lviv, Novyy Svit. ISBN 978-966-418-261-1. [in Russian].
10. Popov, V.S., Bilonik, I.M., Berezhny, S.P. (2003) Application of charge materials obtained by electroslag smelting to improve the quality of weld metal. In: *Abstr. of Papers on Modern Problems of Welding and Structural Life*. Kyiv, PWI, 60–61 [in Russian].
11. Pokhodnya, I.K., Suptel, A.M., Shlepakov, V.N. (1972) *Welding with flux-cored wire*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
12. Shlepakov, V.N., Naumejko, S.M. (2009) Peculiarities of desulphurisation of weld metal in flux-cored wire welding. *The Paton Welding J.*, **2**, 16–18.
13. Lentyugov, I.P., Ryabtsev, I.A. (2015) Structure and properties of metal deposited by flux-cored wire with charge of used metal-abrasive wastes. *The Paton Welding J.*, **6**, 87–89. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.06.19>.
14. Kondratyev, I.A. (2015) Flux-cored wire filled with granular alloy. Surfacing. Technologies, materials, equipment: *Coll. of articles*. Kyiv, PWI, 53–54 [in Russian].
15. Zhudra, A.P., Krivchikov, S.Yu., Dzykovich, V.I. (2014) Application of complex-alloyed powders produced by thermocentrifugal sputtering in flux-cored wires. *The Paton Welding J.*, **12**, 36–40. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.12.08>.

16. Górká, J., Czupryński, A., Żuk, M. et al. (2018) Properties and structure of deposited nanocrystalline coatings in relation to selected construction materials resistant to abrasive wear. *Materials*, **11**(7):1184. <https://doi.org/10.3390/ma11071184>.

17. Pokhodnya, I.K., Gorpenyuk, V.N., Milichenko, S.S. et al. (1990) *Metallurgy of arc welding: Processes in the arc and melting of electrodes*. Ed. by I.K. Pokhodnya. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

WELDING AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF FLUX-CORED WIRE WITH THE CHARGE IN THE FORM OF GRANULAR POWDER

I.O. Riabtsev¹, A.A. Babinets¹, I.P. Lentiugov¹, J. Niagaj², A. Czuprynski³

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

E-mail: a_babinets@ukr.net

²Niagaj J., Upper Silesian Institute of Technology, E-mail: Jerzy.Niagaj@git.lukasiewicz.gov.pl.

³Czuprynski A., Silesian Polytechnic Institute, E-mail: artur.czuprynski@polsl.pl

Comparative experimental studies on the influence of the type and particle size distribution of powders of the original metal granular materials, used as a flux-cored wire charge, on its welding and technological properties during submerged arc surfacing were carried out. High-speed steel powder PG-R6M5 with the granulation of 50...300 μm and 200...250 μm, obtained by spraying a melt metal, was used as a charge for the experimental wires. As the reference, flux-cored wire was used, the charge of which consists of ferroalloys with a granulation of 50...300 μm, calculated to ensure a similar chemical composition of the deposited metal and manufactured using standard technology. It was experimentally determined that the welding and technological properties of three types of wires are at a high level, while the surfacing process with flux-cored wires, the charge of which contains granulated powder PG-R6M5, is characterized by greater stability, which affects an increase in melting and surfacing coefficients, and a decrease in the loss coefficient compared to the analogue wire with a charge of ferroalloy powders. It was also determined that the content of harmful impurities in the specimen deposited by experimental wires with a charge of granular powders is lower than in the reference specimen. The patterns noted above indicate that the use of granulated powder in the charge of flux-cored wires is not only technically possible, but also leads to an increase in the uniformity of a flux-cored wire, which has a positive effect on its welding and technological properties. 18 Ref., 3 Tabl., 2 Fig.

Keywords: arc surfacing, flux-cored wire, flux-cored wire charge, particle size distribution of powders, ferroalloys, welding and technological properties, deposited metal, stability of surfacing, metallurgical heredity

Отримано 16.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 23.05.2024

Прийнято 08.07.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*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 агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр», «Мер-курій» 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.

Можлива також передплата на електронні версії журналів.



Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАГАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЄМНОСТЕЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Царик Б.Р., Махненко О.В.

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

Розглянуто проблему розрахункового прогнозування загальних деформацій великогабаритної ємності з алюмінієвого сплаву при зварюванні тертям з перемішуванням (ЗТП). Розроблено математичну модель на основі чисельних методів термопластичності визначення напружено-деформованого стану при ЗТП, за допомогою якої можливо отримувати залишкові пластичні деформації (параметри функції усадки) для двох типів зварного з'єднання ємності (повздовжнього та кільцевого). Це дає змогу наближеним методом функції усадки в межах теорії пружності прогнозувати загальні деформації великогабаритної циліндричної ємності з великою кількістю зварних з'єднань. Достовірність математичної моделі визначення залишкових напружень і деформацій при ЗТП алюмінієвого сплаву підтверджена узгодженням розрахункових даних відносно розподілу залишкових повздовжніх напружень з даними експериментальних вимірювань. Це може сприяти забезпеченню необхідної точності оцінки загальних деформацій великогабаритних ємностей з алюмінієвого сплаву. Розроблені математичні моделі та розрахункові алгоритми можуть ефективно використовуватись для оперативного прогнозування напружено-деформованого стану при монтажному зварюванні великогабаритних циліндричних ємностей з алюмінієвих сплавів. Бібліогр. 11, рис. 9.

Ключові слова: зварні ємності, алюмінієвий сплав, зварювання тертям з перемішуванням, залишкові деформації, залишкові напруження, математичне моделювання

Вступ. Технологія зварювання широко використовується для виконання з'єднань великогабаритних конструкцій із легких алюмінієвих сплавів, таких як паливні баки для аерокосмічної техніки, корпуси для транспортного машинобудування та ін. [1, 2]. Для прогнозування точності, міцності та довговічності таких зварних конструкцій актуальним завданням є розрахункове визначення залишкових напружень і деформацій. Особливо складною проблемою є розрахункове прогнозування загальних деформацій великогабаритних конструкцій з великою кількістю зварних з'єднань [3], а використання алюмінієвих сплавів для таких конструкцій, як відомо, значно підвищує зварювальні деформації [4]. Розв'язок таких задач потребує великих обчислювальних ресурсів і тривалого часу на розрахунок, що ускладнює використання розрахункових методів на практиці під час технологічної підготовки збирання та монтаж-ного зварювання нових конструкцій. Останнім часом при виготовленні циліндричних ємностей із алюмінієвих сплавів почали використовувати новий процес зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП). Вважається, що при ЗТП забезпечується висока якість зварних з'єднань без таких дефектів як пори та гарячі тріщини, а також значно нижчий рівень залишкових напружень і деформацій у порівнянні з дуговими процесами зварювання

[1, 5]. Таким чином, проблема розробки ефективних розрахункових методів для оперативного прогнозування напружено-деформованого стану при монтажному зварюванні великогабаритних циліндричних ємностей із алюмінієвих сплавів є досить актуальною.

Методологія розрахункового визначення зварювальних деформацій. Для вирішення задачі прогнозування деформацій великогабаритних циліндричних ємностей із алюмінієвого сплаву з великою кількістю зварних швів (рис. 1) застосовано методологію моделювання зварювальних напружень і деформацій на основі комбінованого використання загального методу термопластичності [6] і наближеного методу функції усадки [7]. За допомогою методу термопластичності моделюється тимчасові та залишкові напруження та деформації для окремих зварних з'єднань. Відомо, що залишкові зварні напруження та пластичні деформації утворюються в обмеженій області в зоні зварного з'єднання. Тому розподілення залишкових напружень і параметрів функції усадки може бути отримано на спрощених моделях зварного з'єднання обмеженого розміру, що потребує значно менших комп'ютерних ресурсів і часу на розрахунок.

Стосовно великогабаритних циліндричних ємностей з повздовжніми та кільцевими стиковими з'єднаннями доцільно розглядати два типи спро-

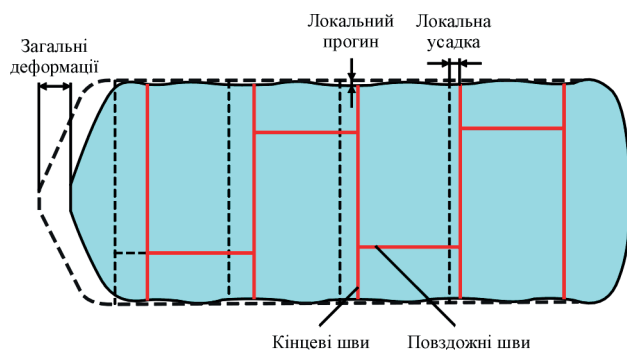


Рис. 1. Схема деформацій циліндричної ємності з великою кількістю повздовжніх і кільцевих зварних з'єднань

щених моделей. Для визначення локальних залишкових деформацій (параметрів функції усадки) у зонах повздовжніх з'єднань можна використовувати модель стикового з'єднання плоских елементів обмеженого розміру (рис. 2, а). У зоні кільцевих з'єднань для визначення залишкових напружень і деформацій (параметрів функції усадки) можна використовувати спрощену модель у двовимірній постановці стикового кільцевого з'єднання реального розміру, але з припущенням швидкорухомого джерела зварювального нагріву та гіпотези «плоскої деформації» (рис. 2, б).

Потім із використанням тривимірної моделі циліндричної ємності реального розміру за допомогою наближеного методу функції усадки в рамках пружної постановки задачі моделюються загальні деформації великогабаритної зварної конструкції від всіх зварних швів.

Узагальнене представлення функції усадки як тензорної функції. Представимо функцію усадки як тензор пластичних деформацій:

$$\Pi_{ij} = \begin{pmatrix} \Pi_{xx} & \Pi_{xy} & \Pi_{xz} \\ \Pi_{yx} & \Pi_{yy} & \Pi_{yz} \\ \Pi_{zx} & \Pi_{zy} & \Pi_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^p & \varepsilon_{xy}^p & \varepsilon_{xz}^p \\ \varepsilon_{yx}^p & \varepsilon_{yy}^p & \varepsilon_{yz}^p \\ \varepsilon_{zx}^p & \varepsilon_{zy}^p & \varepsilon_{zz}^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^p & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy}^p & 0 \\ 0 & 0 & -(\varepsilon_{xx}^p + \varepsilon_{yy}^p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Pi_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \Pi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & -(\Pi_{xx} + \Pi_{yy}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\varepsilon_{xy}^p = \varepsilon_{yx}^p = \varepsilon_{xz}^p = \varepsilon_{zx}^p = \varepsilon_{yz}^p = \varepsilon_{zy}^p = 0$, оскільки осі X і Y є головними осями для повздовжньо-

го та поперечного напрямлення зварних з'єднань, $\varepsilon_{zz}^p = -(\varepsilon_{xx}^p + \varepsilon_{yy}^p)$ з умови збереження об'єму. Якщо вздовж зварного з'єднання функція усадки постійна, тоді $\Pi_{xx} = \varepsilon_{xx}^p(y, z)$, $\Pi_{yy} = \varepsilon_{yy}^p(y, z)$.

Постановка задачі визначення деформації циліндричної оболонки на основі тензорної функції усадки. У циліндричній системі координат тензор повних деформацій ε_{ij} у зварній оболонці буде визначатися сумою тензора пружних деформацій ε_{ij}^e і тензора функції усадки Π_{ij} :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \Pi_{ij}, \quad (i, j = r, \beta, z). \quad (2)$$

Компоненти тензора ε_{ij} виражаються в кожній точці (r, β, z) оболонки трьома компонентами вектору переміщень U_i (співвідношення Коші) [10]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial U_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{\beta\beta} = \frac{\partial U_\beta}{r \cdot \partial \beta} + \frac{U_r}{r}, \\ \varepsilon_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right), \quad \varepsilon_{r\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_r}{r \cdot \partial \beta} + \frac{\partial U_\beta}{\partial r} - \frac{U_\beta}{r} \right), \\ \varepsilon_{z\beta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_\beta}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{r \cdot \partial \beta} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

а також один з одним рівняннями сумісності деформацій. На граничних поверхнях величини переміщень U_i визначаються граничними умовами першого роду, тобто величинами ΔU_r , ΔU_β , ΔU_z .

Рівняння сумісності деформацій [10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{rr}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial r^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{rz}}{\partial r \partial z}; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varepsilon_{rr}}{\partial \beta \partial z} &= -\frac{\partial^2}{\partial r \partial \beta} \left(\frac{\varepsilon_{rz}}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 (r^2 \varepsilon_{r\beta})}{\partial r \partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon_{\beta z}}{\partial r} \right); \\ \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varepsilon_{rr}}{\partial \beta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varepsilon_{\beta\beta}}{\partial r} \right) &= \frac{2}{r} \frac{\partial^2 (r \varepsilon_{\beta r})}{\partial \beta \partial r} + \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial r}; \\ r \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{rr} - \frac{\partial (r \varepsilon_{\beta\beta})}{\partial r} \right) &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{rz}}{\partial \beta^2} - \frac{\partial^2 (r \varepsilon_{\beta z})}{\partial r \partial \beta} - \frac{\partial^2 (r \varepsilon_{\beta r})}{\partial z \partial \beta}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{\beta\beta}}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial \beta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial r} &= \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \varepsilon_{\beta z}}{\partial \beta} + \varepsilon_{rz} \right); \\ \frac{\partial^2}{\partial r \partial \beta} \left(\frac{\varepsilon_{zz}}{r} \right) &= -\frac{\partial^2 \varepsilon_{\beta r}}{\partial z^2} + r \frac{\partial^2}{\partial r \partial z} \left(\frac{\varepsilon_{\beta z}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varepsilon_{rz}}{\partial z \partial \beta}. \end{aligned} \quad (4)$$

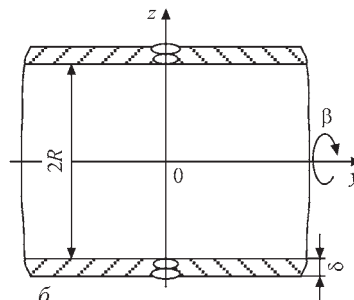
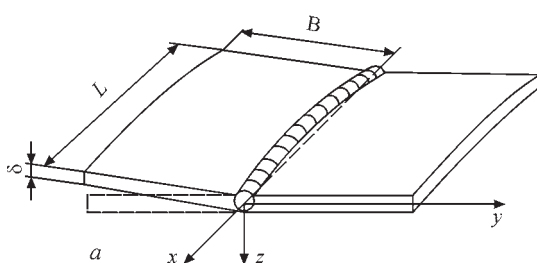


Рис. 2. Визначення параметрів функції усадки: а – 3D модель стикового зварного з'єднання пластин обмеженого розміру; б – 2D модель кільцевого зварного з'єднання

Компоненти тензора повних деформацій ε_{ij} у рамках пружної постановки задачі пов'язані з тензором напружень σ_{ij} законом Гука [8]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E}(\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz})) + \Pi_{rr}; \\ \varepsilon_{\beta\beta} &= \frac{1}{E}(\sigma_{\beta\beta} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{zz})) + \Pi_{\beta\beta}; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E}(\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\beta\beta})) + \Pi_{zz}; \\ \varepsilon_{r\beta} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\sigma_{r\beta} + \Pi_{r\beta}; \quad \varepsilon_{rz} = \frac{2(1+\nu)}{E}\sigma_{rz} + \Pi_{rz}; \\ \varepsilon_{\beta z} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\sigma_{\beta z} + \Pi_{\beta z}.\end{aligned}\quad (5)$$

Компоненти тензора напружень пов'язані один з одним рівняннями рівноваги [10]:

$$\begin{aligned}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_{rr}) + \frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_{r\beta}}{\partial\beta} + \frac{\partial\sigma_{rz}}{\partial z} + \rho F_r &= 0; \\ \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2\sigma_{r\beta}) + \frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_{\beta\beta}}{\partial\beta} + \frac{\partial\sigma_{\beta z}}{\partial z} + \rho F_\beta &= 0; \\ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_{rz}) + \frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_{\beta z}}{\partial\beta} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} + \rho F_z &= 0;\end{aligned}\quad (6)$$

де ρ – густина матеріалу; F_r , F_β , F_z – компоненти масової сили, у розглянутій задачі визначення зварювальних напружень і деформацій у циліндричній оболонці $F_r = F_\beta = F_z = 0$.

Лінійна задача теорії пружності може вирішуватися шляхом переміщень. Із рівнянь узагальненого закону Гука (5) напруження через деформації виглядають наступним чином [8]:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= A_1\varepsilon_{rr} + A_2(\varepsilon_{\beta\beta} + \varepsilon_{zz}) + Y_{rr}; \\ \sigma_{\beta\beta} &= A_1\varepsilon_{\beta\beta} + A_2(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}) + Y_{\beta\beta}; \\ \sigma_{zz} &= A_1\varepsilon_{zz} + A_2(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\beta\beta}) + Y_{zz}; \\ \sigma_{r\beta} &= A_3\varepsilon_{r\beta} + Y_{r\beta}; \quad \sigma_{rz} = A_3\varepsilon_{rz} + Y_{rz}; \\ \sigma_{\beta z} &= A_3\varepsilon_{\beta z} + Y_{\beta z}; \\ A_1 &= \frac{2K + \psi}{3\psi K}; \quad A_2 = \frac{\psi - K}{3\psi K}; \quad A_3 = \frac{1}{\psi}; \\ K &= \frac{1 - 2\nu}{E}; \quad G = \frac{E}{(1 + \nu)};\end{aligned}\quad (7)$$

де E – модуль нормальної пружності (модуль Юнга); K – модуль об'ємного стиску; G – модуль зсуву; ψ – функція стану матеріалу, що враховує пластичну течію, для пружної поведінки матеріалу $\psi = 0,5G$; доданки Y_{ij} враховують навантаження циліндричної оболонки додатковими деформаціями від зварювальної усадки (у загальному вигляді):

$$\begin{aligned}Y_{rr} &= A_1\Pi_{rr} + A_2(\Pi_{zz} + \Pi_{\beta\beta}); \\ Y_{\beta\beta} &= A_1\Pi_{\beta\beta} + A_2(\Pi_{rr} + \Pi_{zz}); \\ Y_{zz} &= A_1\Pi_{zz} + A_2(\Pi_{rr} + \Pi_{\beta\beta}); \\ Y_{r\beta} &= A_3\Pi_{r\beta}; \quad Y_{z\beta} = A_3\Pi_{z\beta}; \quad Y_{rz} = A_3\Pi_{rz};\end{aligned}\quad (8)$$

Для моделювання зварювальних деформацій у циліндричній оболонці від кільцевих і поздовжніх зварних з'єднань можна задавати такі основні параметри функції усадки: пластичні деформації усадки в осьовому Π_{zz} і окружному $\Pi_{\beta\beta}$ напрямках. Пластичні деформації усадки в радіальному напрямку Π_{rr} (по товщині стінки оболонки) викликають локальні деформації і помітно не впливають на загальні деформації зварної циліндричної оболонки. Дотичними компонентами пластичних деформацій усадки Π_{rz} , $\Pi_{r\beta}$, $\Pi_{z\beta}$ можна знехтувати, оскільки напрями зварних швів в циліндричній оболонці збігаються з поздовжнім і кільцевим напрямом циліндричної системи координат.

$$\begin{aligned}Y_{rr} &= A_2(\Pi_{zz} + \Pi_{\beta\beta}); \\ Y_{\beta\beta} &= A_1\Pi_{\beta\beta} + A_2\Pi_{zz}; \\ Y_{zz} &= A_1\Pi_{zz} + A_2\Pi_{\beta\beta}; \\ Y_{r\beta} &= 0; \quad Y_{z\beta} = 0; \quad Y_{rz} = 0;\end{aligned}\quad (9)$$

Використовуючи співвідношення Коші (3), що зв'язують компоненти тензора повних деформацій ε_{ij} з компонентами вектора переміщень U_i , можна представити напруження (7) через переміщення:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= A_1\frac{\partial U_r}{\partial r} + A_2\left(\frac{\partial U_z}{\partial z} + \frac{\partial U_\beta}{r\partial\beta} + \frac{U_r}{r}\right) + Y_{rr}; \\ \sigma_{\beta\beta} &= A_1\left(\frac{\partial U_\beta}{r\partial\beta} + \frac{U_r}{r}\right) + A_2\left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_z}{\partial z}\right) + Y_{\beta\beta}; \\ \sigma_{zz} &= A_1\frac{\partial U_z}{\partial z} + A_2\left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_\beta}{r\partial\beta} + \frac{U_r}{r}\right) + Y_{zz}; \\ \sigma_{r\beta} &= A_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_r}{r\partial\beta} + \frac{\partial U_\beta}{\partial r} - \frac{U_\beta}{r}\right); \\ \sigma_{rz} &= A_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r}\right); \quad \sigma_{\beta z} = A_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_\beta}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{r\partial\beta}\right);\end{aligned}\quad (10)$$

Підставимо отримані вирази для компонентів тензора напружень в рівняння рівноваги (6):

$$\begin{aligned}&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rA_1\frac{\partial U_r}{\partial r} + rA_2\left(\frac{\partial U_z}{\partial z} + \frac{\partial U_\beta}{r\partial\beta} + \frac{U_r}{r}\right)\right) + \\ &+ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\beta}\left(A_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_r}{r\partial\beta} + \frac{\partial U_\beta}{\partial r} - \frac{U_\beta}{r}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(A_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r}\right)\right) = \\ &= -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rY_{rr}); \quad \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2A_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_r}{r\partial\beta} + \frac{\partial U_\beta}{\partial r} - \frac{U_\beta}{r}\right)\right) + \\ &+ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\beta}\left(A_1\left(\frac{\partial U_\beta}{r\partial\beta} + \frac{U_r}{r}\right) + A_2\left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_z}{\partial z}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(A_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_\beta}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{r\partial\beta}\right)\right) = -\frac{1}{r}\frac{\partial Y_{\beta\beta}}{\partial\beta}; \\ &\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rA_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r}\right)\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\beta}\left(A_3\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_\beta}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{r\partial\beta}\right)\right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}\left(A_1\frac{\partial U_z}{\partial z} + A_2\left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_\beta}{r\partial\beta} + \frac{U_r}{r}\right)\right) = -\frac{\partial Y_{zz}}{\partial z};\end{aligned}\quad (11)$$

Отримана система рівнянь щодо трьох компонентів вектора переміщень U_x , U_β , U_z довільної точки (x, β, z) циліндричної оболонки при навантаженні додатковими деформаціями від зварювальної усадки (складові Y_{rr} , $Y_{\beta\beta}$, Y_{zz} у правій частині рівнянь) та граничні умови на поверхні оболонки визначають загальну постановку крайової задачі.

Визначення функції усадки для зварних з'єднань. Для визначення функції усадки були використані методи математичного моделювання температурних розподілів і напружено-деформованого стану стикового з'єднання пластин при зварювальному нагріві.

Особливістю розробленої моделі джерела нагріву при ЗТП є тепловиділення за рахунок тертя інструменту відносно матеріалу з'єднання [6]. Інструмент (рис. 3) обертається навколо вертикальної осі з певною кутовою швидкістю ω , об/с і притискається до пластин з осьовим розподіленим зусиллям P_n , Па, що викликає на поверхні контакту інструменту тепловий потік у матеріал з'єднання:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot r, \text{ (Вт/м}^2\text{);}$$

$$Q = \dot{\lambda} \cdot P_n \cdot \dot{u} \cdot \pi \cdot \iint_S r dS, \quad (12)$$

де μ – коефіцієнт тертя, значення якого може бути прийняте постійним на рівні 0,3...0,4 або змінним в залежності від температури [11], Q – потужність тепловиділення, Вт, S – площа відповідних поверхонь контакту, $Q_1 = 2\pi/3 \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot (R_2^3 - R_1^3)$ на плечі ($z = \delta$, $R_1 > r > R_2$), $Q_2 = 2\pi \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^2 \cdot h$ на бічній поверхні штиря ($r = R_1$, $\delta - h > z > \delta$), $Q_3 = 2\pi/3 \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^3$ на нижній торцевій поверхні штиря ($z = \delta - h$, $0 > r > R_1$), δ – товщина зварюваних пластин, м, h – довжина штиря, м. Потужність об'ємного тепловиділення $W(x, y, z, t)$, Вт/м³ складається з тепловиділення в об'ємі V_1 на верхній поверхні пластин з'єднання під плечем інстру-

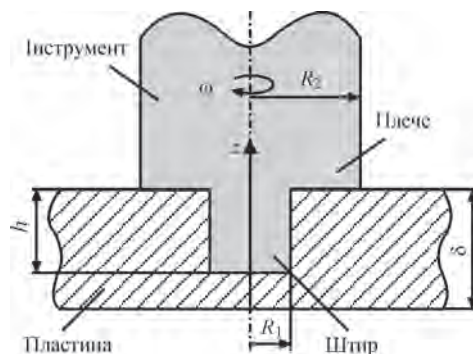


Рис. 3. Схема робочого інструменту та пластин з'єднання при ЗТП

менту та в об'ємі штиря V_2 (dz – розмір скінченного елементу):

$$W(x, y, z, t) = W_1 + W_2 = \frac{Q_1}{V_1} + \frac{Q_2 + Q_3}{V_2} = \frac{2\mu P_n \omega (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2)}{3(R_2 + R_1) dz} + \frac{2\mu P_n \omega}{\delta - h} \left(h + \frac{R_1}{3} \right). \quad (13)$$

Модель термопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання передбачає, що тензор загальних деформацій є сумою пружних і пластичних деформацій [8]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p,$$

$$\text{де } \varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} (K \sigma + \varphi) \quad (i, j = x, y, z) \quad (14)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера, σ – кульовий тензор, G – модуль зсуву, K – модуль об'ємного стищу, E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона, $\varphi = \alpha(T - T_0)$, де α – коефіцієнт відносного температурного подовження матеріалу. Пластичні деформації пов'язані з напруженнями рівнянням теорії пластичної неізотермічної течії (умовою Мізеса) [8].

Результати розрахунку залишкових напружень і пластичних деформацій. Проведено валідацію розрахункової моделі визначення залишкових напружень і деформацій при ЗТП пластин

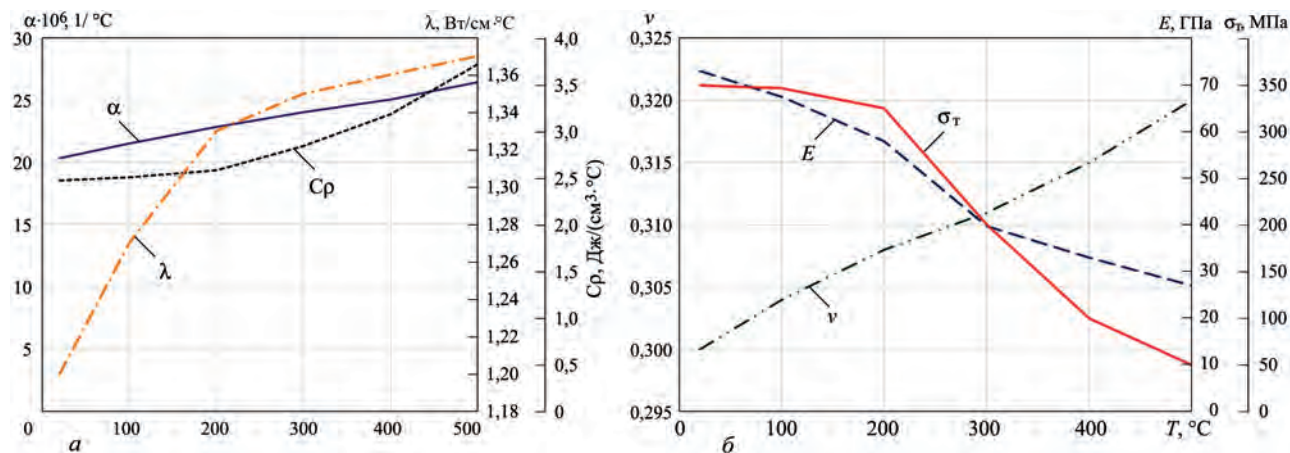


Рис. 4. Теплофізичні (а) і механічні (б) властивості алюмінієвого сплаву (Al-6,5%Cu)

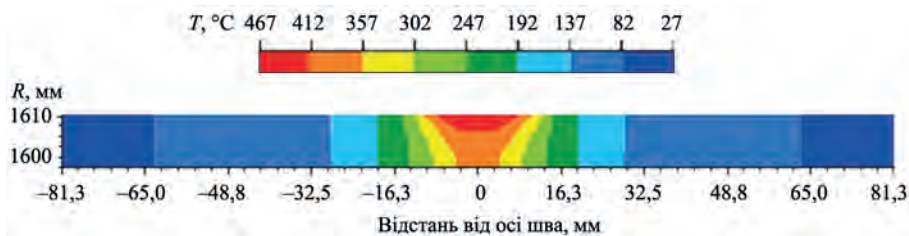


Рис. 5. Максимальна розрахункова температура при ЗТП стикового з'єднання

із алюмінієвого сплаву (Al-6,5%Cu) шляхом порівняння результатів розрахунку за залишковими напруженнями з даними експериментальних вимірювань. Розрахункові залишкові повздовжні напруження при ЗТП стикового з'єднання алюмінієвого сплаву завтовшки 10 мм були визначені в результаті вирішення задачі термопластичності для 3D моделі стикового зварного з'єднання пластин обмеженого розміру 300×300 мм (рис. 2, а). Теплофізичні та механічні властивості алюмінієвого сплаву в залежності від температури наведено на рис. 4 [9]. Параметри ЗТП: $R_2 = 10$ мм, $R_1 = 5$ мм, $\omega = 700$ об/хв, $P_n = 70$ МПа, лінійна швидкість зварювання 160 мм/хв. Максимальна розрахункова температура при заданих параметрах ЗТП не перевищує 470 °C (рис. 5).

Експериментальне вимірювання розподілу залишкових напружень проводили на зразках стикових з'єднань, виконаних ЗТП, методом повного розрізання на темплеті та вимірювання пружних деформацій за допомогою механічного деформометра.

Характер розподілу розрахункових залишкових напружень близький до експериментального (рис. 6). Максимальний рівень розрахункових розтягувальних напружень (до 200 МПа) трохи перевищує експериментальні значення (до 180 МПа). У центрі зварного з'єднання є зона суттєвого зниження розтягувальних повздовжніх напружень, що пов'язано з ефектом розміцнення алюмінієвого сплаву. Також для експериментальних і розрахункових даних характерною є значна різниця між на-

пруженнями на верхній і нижній поверхнях зварного з'єднання — на нижній поверхні залишкові повздовжні напруження вищі.

Оцінка похибки розрахункових даних показує, що в зоні розтягувальних напружень (3 центральні точки, від -16 до +16 мм від осі з'єднання) середньоквадратичне відхилення від експериментальних значень на нижній поверхні зразка складає 21 %, а на верхній поверхні — до 31 %. Така похибка може прийматися задовільною, враховуючи складний характер розподілу залишкових напружень.

Отримано результати розподілів залишкових повздовжніх $\Pi_{xx} = \epsilon_{xx}^p(y, z)$ і поперечних

$\Pi_{yy} = \epsilon_{yy}^p(y, z)$ пластичних деформацій при ЗТП (рис. 7). Треба зазначити, що поперечна та повздовжня пластичні деформації на верхній поверхні зварної пластини приблизно на 25 % вищі за абсолютною величиною за такі на нижній по-

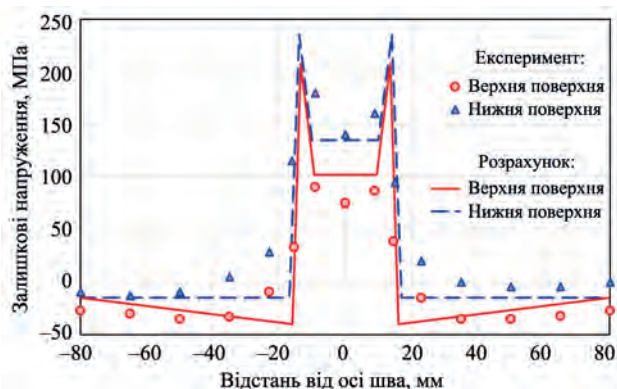
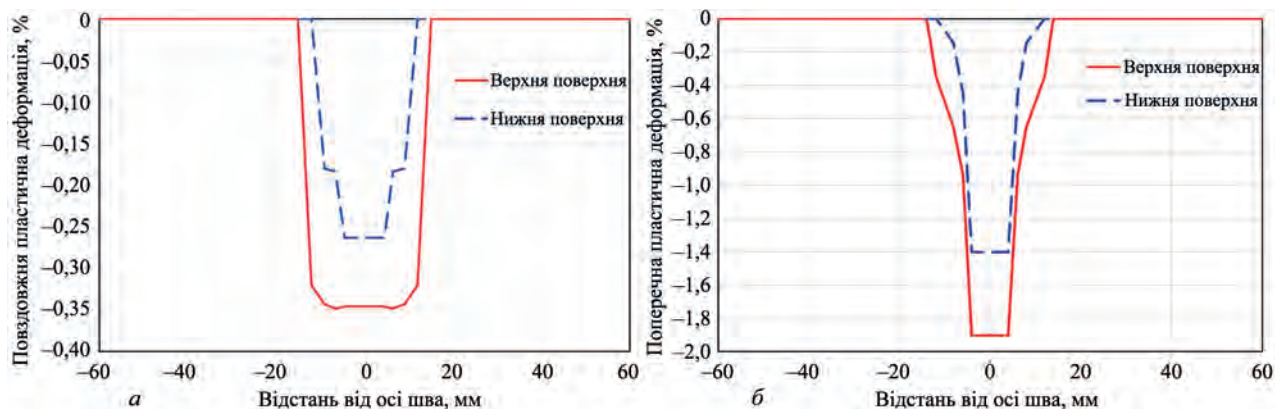


Рис. 6. Розподіл залишкових повздовжніх напружень

Рис. 7. Результати розрахунку розподілу поздовжніх (а) і поперечних (б) пластичних деформацій для стикових зварних з'єднань у моделі ЗТП пластини (300×300 мм, $\delta = 10$ мм)

верхні. Це зумовлено нерівномірним розподілом максимальної температури по товщині зварного з'єднання. Також необхідно зазначити, що поперечні пластичні деформації за абсолютною величиною приблизно у п'ять разів вище, ніж повздовжні, але зона утворення повздовжніх пластичних деформацій в 1,5...2 рази ширше.

Результати моделювання зварювальних деформацій. Отримані розподіли залишкових повздовжніх $\Pi_{xx} = \epsilon_{xx}^p(y, z)$ і поперечних

$\Pi_{yy} = \epsilon_{yy}^p(y, z)$ пластичних деформацій використовувалися при прогнозуванні за методом функції усадки (2) загальних деформацій довгої циліндричної оболонки (рис. 8, а, $2R = 3200$ мм, $L = 6000$ мм, $\delta = 10$ мм), яка містить шість поздовжніх і п'ять кільцевих зварних з'єднань (коорди-

нати розташування кільцевих зварних з'єднань $z = 1, 2, 3, 4, 5$ м, повздовжніх зварних стиків $\beta = 0, \pm 755$ мм). Розв'язок рішення за переміщеннями точок поверхні циліндричної оболонки отримано методом скінченних елементів на повнорозмірній моделі для кожного зварного з'єднання окремо, а потім загальні переміщення додавались за принципом суперпозиції.

Наявність великої кількості кільцевих з'єднань призводить до накопичення по довжині оболонки осевих (повздовжніх) переміщень U_z (рис. 8, в, з). Решта компонентів деформацій: окружні переміщення U_β (поперечна усадка) (рис. 8, б) і радіальний прогин U_r (рис. 8, д, е) мають складний локальний характер розподілу. Цей приклад демонструє ефективність розробленого розрахункового алгоритму при прогнозуванні зварювальних

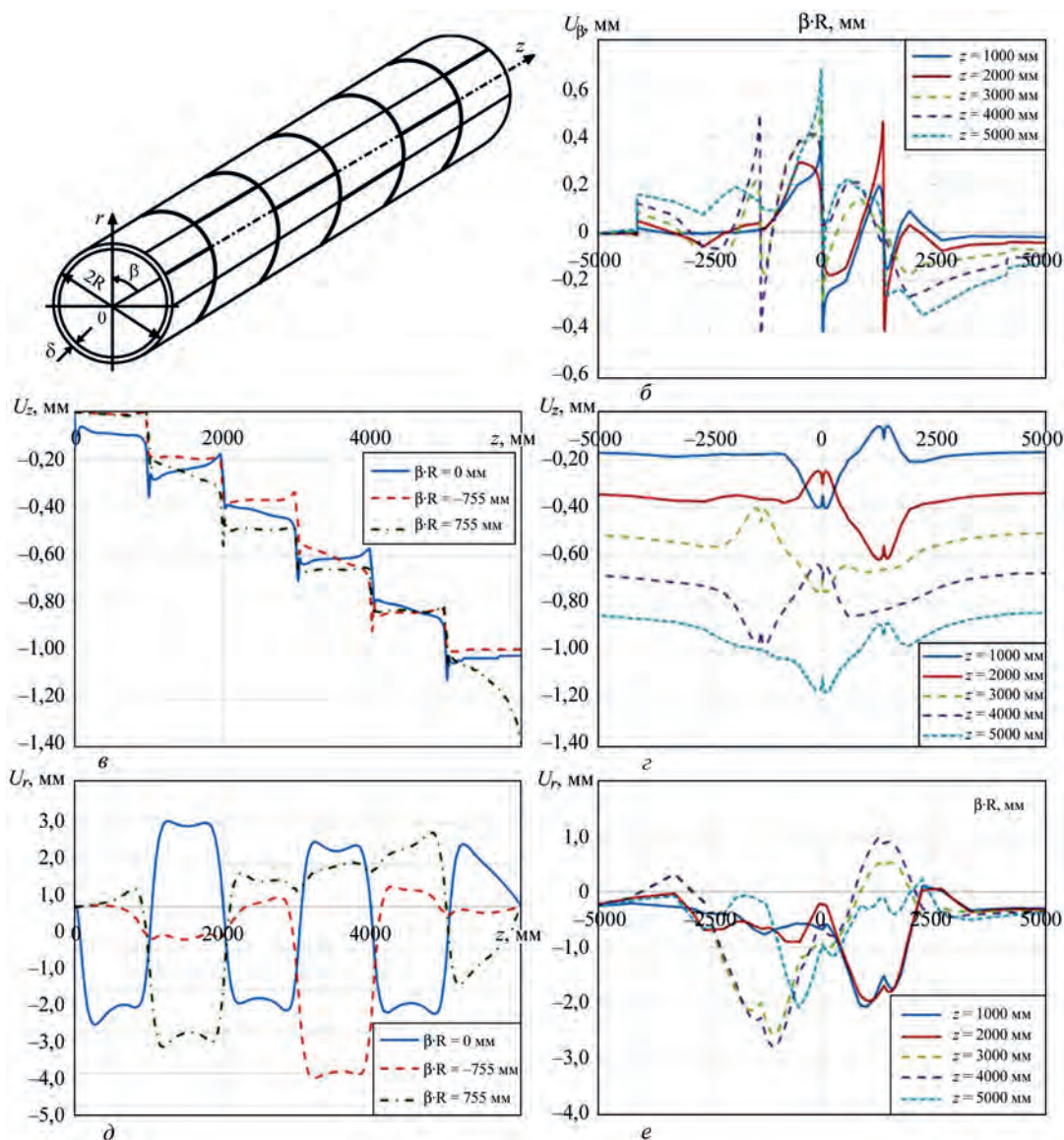


Рис. 8. Зварювальні деформації циліндричної оболонки: а – схема розташування зварних швів; б – переміщення U_β (поперечна усадка) уздовж кола в середньому перерізі зварного шва; в – переміщення U_z уздовж осі шва; г – переміщення U_z уздовж кола в різних перерізах уздовж довжини оболонки; д – радіальний прогин U_r уздовж осі шва, е – радіальний прогин U_r уздовж кола в різних перерізах уздовж довжини оболонки

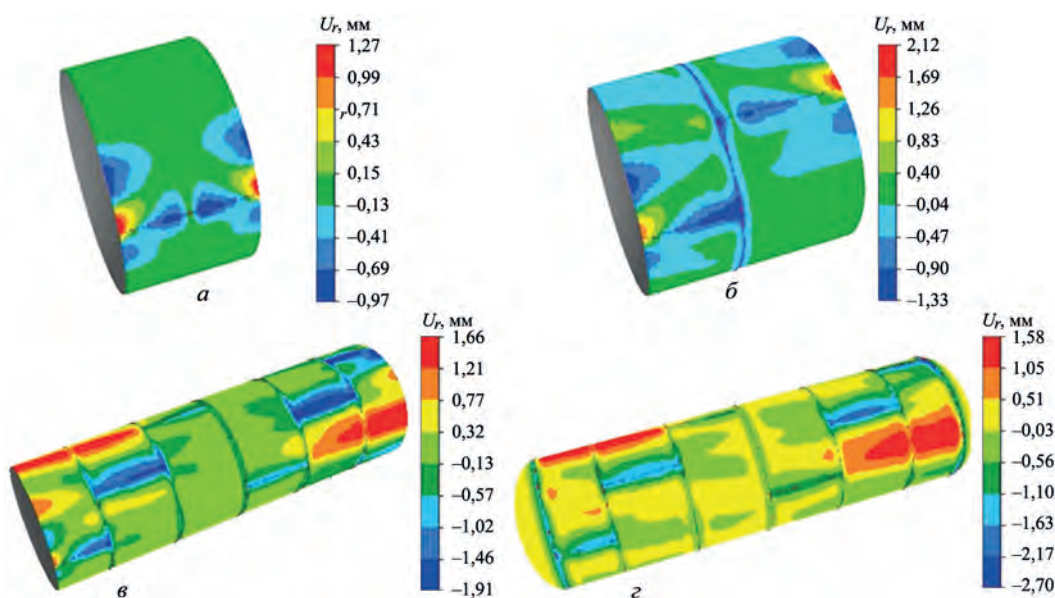


Рис. 9. Радіальні переміщення циліндричної ємності на різних етапах збирання та монтажної зварювання: а – поздовжнє з'єднання кільця оболонки; б – кільцеве з'єднання двох кілець; в – циліндрична оболонка з кільцевими та повздовжніми швами; г – циліндрична ємність з привареними днищами

деформацій великогабаритних циліндричних оболонок з великою кількістю зварних з'єднань на основі наближеного методу функції усадки.

Розроблені математична модель і розрахунковий алгоритм на основі методу функції усадки можуть ефективно використовуватись при технологічній підготовці виготовлення великогабаритних циліндричних ємностей із алюмінієвих сплавів для оперативного прогнозування напружено-деформованого стану. В якості прикладу на рис. 9 представлені результати прогнозування розподілу радіальних переміщень на різних етапах збирання та монтажної зварювання великогабаритної циліндричної ємності. Радіальні переміщення мають складний характер розподілу, прогини до ≈ -3 мм у зонах кільцевих і повздовжніх зварних з'єднань змінюються вигинами оболонки до $\approx 1,5$ мм у проміжках між зварними з'єднаннями. Враховуючи великогабаритні розміри розглянутої зварної ємності (діаметр 3200 мм), отримані максимальні значення переміщень не є високими, що обумовлене низьким рівнем залишкових деформацій при ЗТП.

Висновки

1. Розроблено математичну модель і розрахунковий алгоритм на основі методу функції усадки для чисельного визначення зварювальних деформацій великогабаритних циліндричних оболонок з великою кількістю кільцевих і поздовжніх зварних з'єднань.

2. Параметри функції усадки зварних з'єднань — це пластичні деформації в осьовому Π_{zz} та окружньому $\Pi_{\varphi\varphi}$ напрямках, які можуть визначатись

чисельним шляхом методами термопластичності на спрощених моделях повздовжніх і кільцевих зварних з'єднань. Також ці моделі дозволяють визначати в зоні з'єднання локальні розподіли максимальних температур зварювального нагріву та залишкових напружень.

3. Достовірність математичної моделі визначення залишкових напружень і пластичних деформацій при ЗТП алюмінієвого сплаву підтверджена узгодженням розрахункових даних відносно розподілу залишкових повздовжніх напружень з даними експериментальних вимірювань.

4. Розроблені математичні моделі та розрахункові алгоритми можуть ефективно використовуватись для оперативного прогнозування напружено-деформованого стану при монтажному зварюванні великогабаритних циліндричних ємностей із алюмінієвих сплавів.

Список літератури

1. Покляцький А.Г., Мотруніч С.І., Федорчук В.Є., Фальченко Ю.В., Сагул М. (2023) Механічні властивості та структурні особливості стикових з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів різних систем легування. *Автомат. зварювання*, **5**, 18–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.05.02>
2. Vasanthakumar Pandian, Sekar Kannan (2020) Numerical prediction and experimental investigation of aerospace-grade dissimilar aluminium alloy by friction stir welding. *J. of Manufacturing Processes*, **54**, 99–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.001>
3. Махненко О.В., Мужиченко А.Ф. (2007) Математическое моделирование тепловой правки цилиндрических оболочек и валов с общими деформациями искривления продольной оси. *Автомат. сварка*, **9**, 23–28.
4. Masabuchi, K. (1987) *Analysis of Welded Structures Residual Stresses, Distortions and their Consequences*. Pergamon Press, New-York.
5. Dresbach, C., van Enkhuizen, M.J., Alfaro Mercado, U. et al. (2015) Simulation of thermal behavior during friction

- stir welding process for predicting residual stresses. *CAES Aeronautical J.*, **6**, 271–278. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-014-0145-9>
6. Tsaryk, B.R., Muzhychenko, O.F., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical model of determination of residual stresses and strains in friction stir welding of aluminium alloy. *The Paton Welding J.*, **9**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwg.2022.09.06>
 7. Makhnenko, O.V. (2010) Combined use of the method of thermoplasticity and the method of the shrinkage function for the study of the process of thermal straightening of shipbuilding panels. *J. of Mathematical Sciences*, **167**(2), 232–241. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-010-9917-x>
 8. Мохненко В.І. (1976) *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций*. Киев, Наукова Думка.
 9. Abdulrahman Shuaibu Ahmad, Yunxin Wu, Hai Gong, Lin Nie (2019) Finite element prediction of residual stress and deformation induced by double-pass TIG welding of Al 2219 plate. *Materials*, **12**(14), 2251. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12142251>
 10. Тимошенко С.П. (1972) *Курс теории упругости*. Киев, Наукова Думка.
 11. Saad B. Aziz, Mohammad W. Dewan, Daniel J. Huggett, Muhammad A. Wahab, Ayman M. Okeil et. al. (2016) Impact of friction stir welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum alloy joints. *Acta Metallurgica Sinica*, **29**, 869–883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0466-2>
 3. Makhnenko, O.V., Muzhychenko, A.F. (2007) Mathematical modelling of thermal straightening of cylindrical shells and shafts with distortions along their longitudinal axis. *The Paton Welding J.*, **9**, 17–22.
 4. Masabuchi, K. (1987) *Analysis of Welded Structures Residual Stresses, Distortions and their Consequences*. Pergamon Press, New-York.
 5. Dresbach, C., van Enkhuizen, M.J., Alfaro Mercado, U. et al. (2015) Simulation of thermal behavior during friction stir welding process for predicting residual stresses. *CAES Aeronautical J.*, **6**, 271–278. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-014-0145-9>
 6. Tsaryk, B.R., Muzhychenko, O.F., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical model of determination of residual stresses and strains in friction stir welding of aluminium alloy. *The Paton Welding J.*, **9**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwg.2022.09.06>
 7. Makhnenko, O.V. (2010) Combined use of the method of thermoplasticity and the method of the shrinkage function for the study of the process of thermal straightening of shipbuilding panels. *J. of Mathematical Sci.*, **167**(2), 232–241. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-010-9917-x>
 8. Makhnenko, V.I. (1976) *Calculation methods for studying the kinetics of welding stresses and deformations*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 9. Abdulrahman Shuaibu Ahmad, Yunxin Wu, Hai Gong, Lin Nie (2019) Finite element prediction of residual stress and deformation induced by double-pass TIG welding of Al 2219 plate. *Materials*, **12**(14), 2251. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12142251>
 10. Timoshenko, S.P. (1976) *Elasticity theory course*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 11. Saad B. Aziz, Mohammad W. Dewan, Daniel J. Huggett, Muhammad A. Wahab, Ayman M. Okeil et. al. (2016) Impact of friction stir welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum alloy joints. *Acta Metallurgica Sinica*, **29**, 869–883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0466-2>

References

MATHEMATICAL MODELING OF OVERALL DISTORTIONS AT WELDING OF LARGE-SIZED VESSELS OF ALUMINUM ALLOYS

Tsaryk B.R., Makhnenko O.V.

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

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

The problem of calculation prediction of the overall distortions of a large vessel made of aluminum alloy during friction stir welding (FSW) is considered. A mathematical model was developed using numerical thermoplasticity analysis for determining the stress-strain state during FSW, by the means of which it is possible to obtain residual plastic strains (the inherent strain function) for two types of the vessel welded joints (longitudinal and circular). This allows prediction of the overall distortions of a large-sized cylindrical vessel with a large number of welded joints by the approximate method of inherent strains within the limits of the theory of elasticity. The reliability of the mathematical model for determining the residual stresses and strains at FSW of aluminum alloy is confirmed by the agreement of the calculated data on distribution of the residual longitudinal stresses with the data of experimental measurements. This can contribute to ensuring the necessary accuracy of predicting the overall distortions of large vessels of aluminium alloy accordingly. The developed mathematical models and calculation algorithms can be effectively used for operational prediction of the stress-strain state during assembly welding of large-sized cylindrical vessels made of aluminum alloys. 11 Ref., 9 Fig.

Keywords: welded vessels, aluminum alloy, friction stir welding, plastic strains, residual stresses, mathematical modeling

Отримано 01.07.2024

Отримано у переглянутому вигляді 10.07.2024

Прийнято 31.07.2024

РОЗВИТОК КОНТАКТНО-СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ

У 1944 р. Є.О. Патон поставив завдання розробити та обладнати для контактної-стикового зварювання. З цією метою в ІЕЗ було створено електротехнічний відділ, який очолив Б.Є. Патон.

Винайдений у США в 1877 р. Е. Томсоном спосіб стикового зварювання одразу став широко застосовуватися для виготовлення інструменту, снарядів, деталей машин та інших виробів відносно невеликого перерізу, а точкове зварювання стало провідною технологією на автомобільних заводах. Це був найбільш механізований та автоматизований вид зварювання.

Але для промисловості та будівництва необхідно було стикове контактне зварювання виробів більшого перерізу. Проте виявилось, що зі збільшенням потужності традиційного зварювання опаленням, та площі поперечного перерізу деталей, особливо з розвиненим контуром, важко контролювати процес, уникнути дефектів у площині з'єднання та отримати необхідну стабільну якість.

В ІЕЗ було започатковано дослідження вторинних ланцюгів контактних машин, особливостей зварювального контакту, опалення, можливостей підвищення теплової потужності, зниження опору короткого замикання та ін. Було створено системи багатфакторного керування процесом контактного зварювання опаленням. Зокрема, В.К. Лебедев розробив принцип подібності. Було знайдено ряд конструктивних рішень, у тому числі, що стосуються вторинного контуру зварювальної машини зі знизеним опором короткого замикання, а також різні типи регуляторів струму.

У 1949 р. В.К. Лебедевим і М.Г. Остапенко було запропоновано та розраховано принципово нову схему трансформатора кільцевого типу для контактної зварювання виробів з великою площею

контакту. Сердечником трансформатора є кільце, яке може розташовуватися всередині труби або охоплювати її зовні. Первинні та вторинні витки рівномірно розподілені по всій довжині сердечника. Вторинний виток може бути суцільним або складатися з кількох окремих елементів.

Кільцевий контурний трансформатор став основою для нового виду контактної-стикового зварювання. Було виконано теоретичні та експериментальні дослідження основних різновидів такого зварювання та визначено межі застосування критеріїв фізичного моделювання, що дозволило застосувати метод фізичного моделювання при розв'язанні практичних задач (Ю.Д. Яворський та ін.).

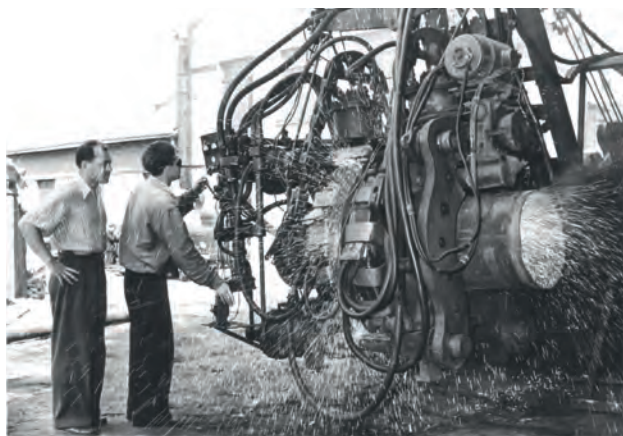
Машини з кільцевим трансформатором мають у 10-20 разів менший опір короткого замикання, ніж звичайні універсальні стикові машини великої потужності. Завдяки зменшенню споживаної потужності, новим конструктивним рішенням вдалося спроектувати компактні машини зі значно зменшеною вагою.

У 1950-1960-х рр. розроблено технологію та створено складально-зварювальні пересувні комплекси для контактної стикового зварювання опаленням (КСЗО) труб, рейок, стрижнів, інструменту, профільного прокату великого перерізу (В.К. Лебедев, С.І. Кучук-Яценко, В.О. Сахарнов, С.О. Солодовников).

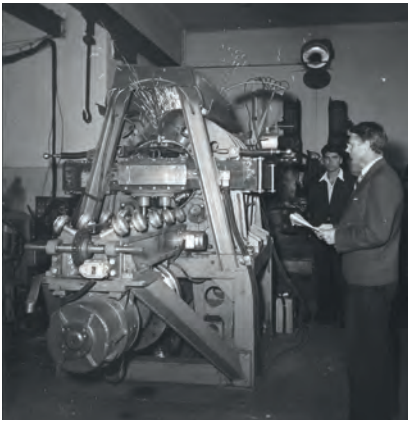
У 1952-1960-х рр. розроблено технологію та створено мобільну зварювальну машину К355 і стаціонарну машину К190, які протягом 35-ти років виготовляв Каховський завод електрозварювального обладнання та які стали прототипом наступних розробок мобільних і стаціонарних рейкозварювальних машин (В.К. Лебедев, М.Г. Остапенко, В.О. Сахарнов, С.І. Кучук-Яценко, Б.А.



Зварювання магістрального трубопроводу за допомогою контактної трубокварювального агрегату КТЗА-12



Випробування дослідної машини для зварювання труб



С.І. Кучук-Яценко та О.В. Сахарнов в лабораторії контактного зварювання, 1958 р.

Галян та ін.). У 1965-1985 рр. понад 150 мобільних і стаціонарних рейкозварювальних машин придбали фірми провідних країн Європи, Азії, Північної та Південної Америки.

У 1973 р. Б.Є. Патонем були сформульовані вихідні дані для розробки дослідного зразка машини для стикового зварювання труб великих діаметрів за умов будівництва надпотужних трубопроводів, теоретично обґрунтовані способи управління зварюванням імпульсним оплавленням. У 1970-х роках В.К. Лебедєвим, В.А. Сахарновим та С.І. Кучуком-Яценком були створені конструкції обладнання та технології зварювання безперервним оплавленням, що дозволяють зварювати вузли з компактним і розвиненим перетином практично необмеженої величини. Під керівництвом С.І. Кучука-Яценка розробляли технології та устаткування для зварювання теплостійких труб для енергетики, бурильних труб високих категорій міцності, труб промислових і магістральних трубопроводів для транспортування нафти та газу, корозійностійких труб для роботи в агресивних середовищах при різноманітних умовах зварювання (Б.І. Казимов, В.Ф. Загадарчук та ін.). Важливими є дослідження в галузі технології та устаткування для підводного зварювання труб при будівництві та ремонті морських нафто- і газопроводів. Було визначено оптимальні алгоритми



Випробування апарата для зварювання залізничних рейок в ІЕЗ



Монтаж внутрішньотрубною машини на Дослідному заводі зварювального устаткування ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Праворуч – директор заводу Г.Б. Асоянц, ліворуч на передньому плані С.І. Кучук-Яценко, В.А. Сахарнов, А.Д. Кулешов, 1975 р.

контролю та керування процесом зварювання, створено та впроваджено нове покоління стикових машин з комп'ютеризованим керуванням і контролем параметрів режиму контактного стикового зварювання обсадних труб та магістральних трубопроводів, залізничних рейок, металоконструкцій, ліній електропостачання та гарячого прокату (В.П. Кривонос та ін.).

Інженерним центром зварювання тиском (директор В.Г. Кривенко) виконано роботу з впровадження у виробництво розробок з контактного стикового зварювання рейок, труб і виробів для авіаційно-космічної техніки.

До кінця 1970-х рр. розроблено машини для зварювання в польових умовах труб великих діаметрів для магістральних трубопроводів – K700, K800, K830, а також машини K775, ліцензія на конструкцію якої була продана фірмі «McDermott», США.

У 1976 р. було розроблено технологію та обладнання для зварювання високоміцної стрижневої арматури, що використовується в будівельних конструкціях, зварювальні машини K724, K724A та автоматизовані лінії K777 і K819 (П.М. Чвертко, О.М. Малахов). Розроблено технологію та устаткування для контактної багатопозиційного зварювання оплавленням, технологічний процес



Трубозварювальна машина K700

якого поєднує в собі складальні та зварювальні операції, а саме – комплекс К579 для контактного зварювання картерів потужних дизелів тепловозів на Коломенському заводі (І.О. Черненко) та лінія К529 для виготовлення охолоджувачів потужних трансформаторів на Запорізькому трансформаторному заводі (В.Т. Чередничок).

Для підвищеної питомої потужності, концентрації енергії при скороченні зони термічного впливу, скорочення припуску на оплавлення розроблено процес зварювання пульсуючим оплавленням (С.І. Кучук-Яценко, М.В. Богорський). Продуктивність складально-зварювальних робіт збільшилася в 5-10 разів, витрата електроенергії знизилася до 2-х разів, зварювання виконується без допоміжних матеріалів, процес повністю автоматизовано, що забезпечує стабільне відтворення заданих режимів.

Перші дослідні та технологічні роботи з контактної стикової зварювання алюмінієвих сплавів були проведені наприкінці 1950-х років. У наступні роки було розроблено технології та обладнання для контактної стикової зварювання різних виробів зі сплавів на основі магнію, титану, нержавіючих і жароміцних сталей та сплавів.

В ІЕЗ було розроблено технології та обладнання для контактної стикової зварювання різних виробів із сплавів на основі алюмінію з площею поперечного перерізу до 90000 мм² (Л.О. Семенов, Г.П. Сахацький, В.І. Тишура), у тому числі шпангоутів з пресованих профілів високоміцних алюмінієвих сплавів діаметром більше 500 мм, а також листів завширшки до 2000 мм, завтовшки до 50 мм і поздовжніх швів обичайок з цих листів діаметром понад 2000 мм. Технологічний процес поєднує в собі складальні та зварювальні операції, не вимагає допоміжних витратних матеріалів (електроди, дріт, флюси, захисні гази) і легко піддається автоматизації та роботизації. При зварюванні не потрібно проводити прецизійну підготовку торців деталей. У 1965 р. було впроваджено першу установку для контактної стикової зварювання оплавленням шпангоутів ракет-носіїв на одному з авіаційних заводів СРСР (Г.П. Сахацький, Л.О. Семенов). Технології та спеціалізоване обладнання було впроваджено на ракетобудівних заводах СРСР.

У 1986 р. на ДП «ВО «Південний машинобудівний завод ім. О.М. Макарова» (м. Дніпро) впроваджено зварювальну машину К393 для серійного виготовлення шпангоутів і машина К825 для серійного виготовлення обичайок паливних баків з високоміцних алюмінієвих сплавів з площею поперечного перерізу до 80000 мм² (тобто фактич-



Зварювання шпангоута на «Південному машинобудівному заводі»

но силових конструкцій) балістичних міжконтинентальних ракет-носіїв. Ця технологія стабільно забезпечує високу герметичність при коефіцієнті міцності не нижче 0,90 від основного металу та коефіцієнті корисного використання металу до 0,95.

У 1990 р. досліджено вплив складу газового середовища в іскровому зазорі між деталями на якість з'єднань, отримано нові дані про вплив кисню в іскровому зазорі на якість зварних з'єднань складнолегованих сталей. Створено способи контактної зварювання з використанням локальних камер, що дозволяють контролювати та змінювати склад газового середовища в іскровому зазорі з метою поліпшення якості з'єднань (І.В. Зяхор).

У 1995 р. розроблено технологію (Ю.В. Швець) та устаткування для КСЗО зносостійкої високомарганцевої сталі 110Г13Л (сталь Гатфільда) з рейковою сталлю М76, що забезпечило можливість налагодити виготовлення залізничних хрестовин на Дніпровському стрілочному заводі. У 1996 р. розроблено, виготовлено та впроваджено у виробництво нове покоління машин для контактної зварювання рейок необмеженої довжини у польових умовах при спорудженні швидкісних залізничних магістралей. У машинах реалізовано технології та системи автоматичного керування процесом зварювання (Руденко П.М.), що забезпечують у процесі зварювання заданий рівень напружень розтягу. Це гарантує високу стабільність рейкового шляху.

Також було розроблено технологію та створено пересувні підвісні машини для зварювання залізничних рейок необмеженої довжини. На основі кільцевого контурного трансформатора створено пересувні трубозварювальні комплекси, самохідні внутрішньотрубні снаряди, установки для зварювання прокату, вузлів ракет з розвиненим перетином практично необмеженої величини та ін.

Д.і.н. Олександр Корнієнко

ТЕНДЕНЦІЇ І ТЕХНОЛОГІЇ У ЗВАРЮВАЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ: БАЧЕННЯ «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС»

Зварювальна індустрія стоїть на порозі значних змін, викликаних новими технологіями та потребами ринку, що змінюються. Завод «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС», один із провідних виробників зварювального дроту в Україні, активно адаптується до цих змін і пропонує свої інноваційні рішення.

Основні тенденції розвитку ринку. Тенденції розвитку ринку зварювальних матеріалів прогнозують його значне зростання впродовж наступних шести років. Зварювальні технології широко застосовуються для створення металоконструкцій у різних галузях економіки, таких як будівництво цивільних і промислових споруд, мостів, трубопроводів та ін. Автомобільна та паливно-енергетична галузі є основними драйверами цього росту, активно використовуючи зварювальні технології для виготовлення металоконструкцій. Енергетичний сектор також задовольнятиме зростаючі потреби в потужностях сонячних і вітрових електростанцій.

Основні фактори зростання ринку зварювальних матеріалів включають індустріалізацію, урбанізацію та технічний прогрес.

Сучасні виклики та рішення. Основними перешкодами для розвитку ринку є нестабільні поставки сировини та коливання цін. Зміни в правилах торгівлі, дисбаланс поставок, екологічні вимоги, коливання валютних курсів і геополітичні загрози суттєво впливають на вартість сировини, що негативно позначається на виробництві та вартості зварювальних матеріалів.

Індустрія, пов'язана з виробництвом зварювальних матеріалів, вимушена вирішувати проблему нестачі кваліфікованих зварювальників у зв'язку з масовим виходом на пенсію досвідчених працівників. Це особливо сильно вплинуло на такі галузі, як важке машинобудування, автомобілебудування та будівництво, де зварювальні технології використовуються найбільш інтенсивно.

У відповідь на цей виклик завод «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» активно налагоджує зв'язки з навчальними закладами та інвестує в підготовку молодих фахівців. Завод також співпрацює з замовниками та концентрує свої зусилля на навчанні користувачів, надає консультації та технічну допомогу на всіх етапах – від вибору матеріалу до застосування продукції. Це сприяє зміцненню бренду та створенню міцних партнерських відносин.

В Європі очікується стабільне розширення ринку зварювальних матеріалів завдяки розвиненій інфраструктурі. «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» працює над розширенням європейського ринку збуту, зокрема в Німеччині, економіка якої вважається

однією з найпотужніших у Європі. Європейський Союз посилює заходи з охорони навколишнього середовища, що веде до зростання виробництва екологічно чистої продукції. Це спонукає розробляти зварювальні матеріали, які знижуватимуть рівень забруднення у майбутньому.

Диверсифікація продукції та впровадження нових технологій є основними стратегіями для зростання та розвитку на ринку.

Основні сегменти ринку зварювальних матеріалів. Ринок зварювальних матеріалів ділиться на кілька категорій залежно від типу матеріалу: дріт суцільного перерізу (38 %), порошковий дріт (27 %), покриті електроди для ручного дугового зварювання (26 %) та дріт і флюси для зварювання під флюсом (9 %).

Сегмент дроту суцільного перерізу зберігає лідерство завдяки широкому застосуванню в різних галузях. Очікується, що цей сегмент продовжить домінувати, оскільки цей дріт активно використовується для дугового зварювання в інертних газах. Його висока продуктивність, ефективність і здатність створювати чисті й міцні зварні шви привертають увагу нових учасників ринку.

Сучасна індустрія зварювальних матеріалів зосереджена на розробці простих і економічних рішень для захисту деталей від зовнішнього середовища. Для запобігання окисленню дріт суцільного перерізу покривають міддю, що покращує провід-





ність. Однак мідь не підходить для деяких типів зварювання, що підвищує попит на полірований дріт з високим ступенем очищення поверхні. Такий дріт особливо корисний у роботизованому зварюванні, але його пропозиція на ринку поки обмежена.

Покриті електроди для ручного дугового зварювання, призначені переважно для низьколегованих і низьковуглецевих сталей, залишаються популярними завдяки широкому діапазону застосування та доступності.

Асортимент продукції заводу «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» включає широкий спектр діаметрів обмідненого зварювального дроту, а також дріт без покриття полірованого. Дріт марок G3Si1 і G4Si1 виготовляється відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 14341 (національний стандарт ДСТУ EN ISO 14341). Завод прагне запропонувати не тільки зварювальні матеріали, але й комплексні рішення, що включають технології застосування для ефективного виконання зварювальних завдань. Мета заводу полягає в тому, щоб клієнти бачили в «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» не просто постачальника, а стратегічного партнера, здатного вирішувати їхні завдання.

Інновації та автоматизація. Автоматизація та роботизація зварювальних процесів стають основою майбутнього розвитку галузі. Роботизовані зварювальні комплекси дозволяють значно підвищити продуктивність і якість зварювальних робіт, а також знизити ризики отримання травм. Щоби повністю задовольнити потреби клієнтів, «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» розширив асортимент зварювального дроту, додавши новий формат — бочки по 250 кг для роботизованих систем. Ця продукція дозволяє автоматизувати процеси на великих підприємствах.

На заводі для виробництва зварювального дроту застосовуються передові технології від шведського виробника Lämneå Bruk AB і високоякісна сировина. Контроль якості катанки та випробування готової продукції проводяться у власній акредитованій лабораторії, оснащеній сучасними приладами для хімічного аналізу, механічних тестів і зварювально-технологічних випробувань. Це забезпечує випуск продукції найвищої якості, перевіреної на провідних промислових підприємствах.

Інтеграція цифрових технологій з промисловими процесами стає все важливішою. Четверта промислова революція, спрямована на створення «розумних» виробництв, вже впливає на зварювальну індустрію. Завод «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» використовує інтелектуальні системи управління виробництвом, що дозволяє підвищувати його ефективність і гнучкість, а також покращувати орієнтацію на споживача на всіх етапах виробництва.

Завод приділяє особливу увагу сертифікації нашої продукції та має кілька важливих сертифікатів. Система менеджменту якості виробництва сертифікована згідно з ISO 9001 органом сертифікації систем управління ТОВ «ГЛОБАЛ-СЕРТИФІК». Крім того, наша продукція відповідає європейським нормам TÜV NORD, що підтверджує її високу якість і відповідність міжнародним стандартам. Також маємо Сертифікат відповідності від Deutsche Bahn, що є вагомим показником надійності та якості нашої продукції. Наш дріт з маркуванням G4Si1 успішно пройшов випробування в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона і може використовуватися у виробництві та монтажі сталевих мостових конструкцій. ТОВ «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» також надано право маркування продукції знаком СЕ, що свідчить про відповідність нашої продукції вимогам безпеки та охорони здоров'я в Європейському Союзі.

Погляд у майбутнє. У майбутньому ми плануємо продовжувати інвестувати в новітні технології та розширювати асортимент продукції, щоб задовольнити потреби наших клієнтів. Ми впевнені, що використання високоефективного зварювального дроту виробництва «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» допоможе замовникам адаптуватися до нових викликів та досягти успіху у своїй діяльності. Наше бачення майбутнього полягає у створенні інноваційних рішень, що дозволять зварювальним технологіям досягти нових висот, забезпечуючи високу якість, надійність та екологічність.

Завод «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» завжди готовий підтримати своїх клієнтів на шляху до успіху, надаючи їм найкращі продукти та рішення на ринку зварювальних матеріалів.

XXII МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

28-30 травня 2024 р. на території Міжнародного виставкового центру під егідою XXII Міжнародного промислового форуму – найбільшого в Україні щорічного заходу з машинобудування – відбулися в єдиному форматі Міжнародні спеціалізовані виставки: Металообробка; УкрЗварювання; УкрВторТех; УкрЛитво; Гідравліка. Пневматика; Підшипники; Автоматизація і робототехніка; Підйомно-транспортне, складське обладнання; Зразки, стандарти, еталони, прилади; Безпека виробництва; VII Міжнародна спеціалізована виставка ADDIT EXPO 3D.

Аудиторія тих, що цікавиться виставками, – це вузькопрофільні фахівці в галузях машинобудування, металообробки, оборонної промисловості, будівельної, автомобільної та електронної індустрії,

створення прототипів, медицини та протезування, легкої промисловості та сфери реклами. Цього року Міжнародний промисловий форум відновив свій статус наймасштабнішої події країни і вразив відвідувачів кількістю та технологічністю представленого обладнання. Підприємства продовжують розвиватись попри складні умови, не зупиняючи нові перспективні проекти. Ключовою особливістю стала вражаюча кількість українських виробників з інноваційними розробками металообробних верстатів, твердосплавного інструменту, станків плазмової різки, зварювального обладнання, установок з нанесення покриттів, високоякісних вимірювачів, лабораторного обладнання, гідравлічних і пневматичних компонентів, компресорів, кранового устаткування та автоматизованих систем. Виставку від-



Стенд інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, директор інституту акад. Ігор Кривтун (в центрі) з співробітниками



відали представники різних галузей з конкретними завданнями та амбітними проєктами. Це створило сприятливу атмосферу для обміну досвідом. Компанії отримали зворотний зв'язок з замовниками, що допомагає вдосконалювати товари та послуги і задовольняти потреби партнерів.

Загальна площа, на якій розмістились п'ять виставкових заходів – 21000 м², у виставках взяли участь 347 компаній з восьми країн світу (Китай, Литва, Туреччина, Нідерланди, Німеччина, Польща, Румунія, Україна). Виставки відвідали понад 7258 осіб. У рамках форуму відбулися численні презентації, семінари, круглі столи та дискусії, що охоплювали актуальні питання, які постали перед учасниками ринку.

Продукцію українських виробників на форумі оглянула й перша віце-прем'єр міністерка, міністерка економіки України Юлія Свириденко та заступник голови Комітету з питань економічного розвитку Верховної Ради Дмитро Кисилевський. Спільно з представниками федерації роботодавців України та асоціації міст України вони презентували каталог техніки українських виробників для громад. Туди увійшли 255 одиниць техніки, які виробляються на 32-х підприємствах з 14-ти областей України. За словами Юлії Свириденко, до 40 % коштів, витрачених державою на закупівлю продукції українського виробництва, повертається українцям у вигляді зарплат, податків і зборів. Це також дозволить вітчизняним підприємствам більше інвестувати у високоточне обладнання для виробництва, яке представлено на цьогорічному заході.

Вже традиційно багато років поспіль на МПФ проходить Нарада-конференція керівників і фахівців ливарної галузі України «Промисловість України. Ливарне виробництво як основна складова для відродження промислового комплексу». Обговорили питання, пов'язані зі скороченням потенціалу галузі через бойові дії та окупацію промислових регіонів, необхідність масштабувати виробництва для виходу на довоєнний рівень продуктивності, щоб задовольнити потреби споживачів.

У рамках серії семінарів та доповідей з адитивних технологій, які проходили на відкритому майданчику виставки «Addit Expo 3D», обговорили актуальність і перспективи 3D друку металічними та полімерними матеріалами, 3D моделювання та проведення інженерних розрахунків, управління даними про виріб та розробку проєктної документації.

Конструктивному діалогу між науковою спільнотою та представниками бізнесу посприяв круглий стіл «Інноваційні технології металообробки для реіндустріалізації України», організований Інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова, під

час якого обговорили основні здобутки науки в галузі нових функціональних матеріалів, новітніх методів металооброблення, порошкової металургії та адитивних технологій, а також про роль R&D та R&I у реіндустріалізації.

У роботі виставки УкрЗварювання взяли участь такі відомі фірми як Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, ПАО «ПлазмаТек», ТОВ «ДНІПРОМЕТІЗ ТАС», ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД», ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК», ТОВ «ПАТОН ІНТЕРНЕТ-НЛ», ТОВ «ФРОНІУС УКРАЇНА», ПП ТОВ «Бінцель Україна ГмбХ», ТОВ «ТРИАДА-ЗВАРКА», ТОВ НВФ «Ультракон», ТОВ НВФ «ДІАГНОСТИЧНІ ПРИЛАДИ» та ін.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона традиційно взяв участь у роботі виставки та презентував наступні розробки: комплекс обладнання для проведення електронно-променевого зварювання в умовах космосу, обладнання для пресового зварювання труб магнітокерованою дугою, обладнання та технологію 3D друку металевих виробів із порошкових матеріалів, а також зразки зварних з'єднань з алюмінієвих і титанових сплавів отримані в умовах високого вакууму.

На стенді заводу ТОВ «ДНІПРОМЕТІЗ ТАС», був представлений зварювальний дріт в асортименті:

- обміднений зварювальний дріт СВ-08Г2С, G4Si1, G3Si1 суцільного перерізу з прецизійним намотуванням;
- зварювальний дріт без покриття, полірований суцільного перерізу;
- зварювальний дріт для роботизованих комплексів у діжках масою 250 кг.

Нааявність у продукції Заводу сертифіката відповідності стандартам Deutsche Bahn викликала особливий інтерес у відвідувачів. Цей сертифікат підтверджує високу якість і безпеку зварювального дроту, які відповідають європейським стандартам, що є важливим показником для клієнтів та партнерів. Стенд Заводу мав велику популярність протягом усіх трьох днів виставки. Укладені угоди та попередні домовленості свідчать про високий інтерес до продукції Заводу та зміцнюють його позицію на ринку зварювальних матеріалів.

Ефективність виставок XXII Міжнародного промислового форуму була підтверджена цілою низкою підписаних під час заходів контрактів, тому більшість обладнання поїхало до своїх нових власників прямо з виставкового центру.

Дякуємо ЗСУ! Завдяки незламності та мужності наших захисників ми маємо змогу працювати і проводити наші виставки! Наступна виставка відбудеться 27-29 травня 2025 р.

За матеріалами пост-релізу ТОВ «МВЦ»
<https://www.iec-expo.com.ua>

І МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА»

6-7 червня 2024 р. у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя відбулась I Міжнародна науково-технічна конференція «Прикладна механіка», присвячена 80-річчю з дня народження професора Чеслава Вікторовича Пульки. У роботі конференції взяли участь вчені з 32-х закладів вищої освіти, наукових установ НАН України та закордонних науковців. Тематика конференції: сучасні технології машинобудування; нові методи зварювання, наплавлення, напилення; механіка руйнування матеріалів і конструкцій; надійність і довговічність механізмів і машин; покриття, нові технології нанесення; мехатроніка, робототехніка, дрони; прикладне матеріалознавство.

Конференцію відкрив проректор з наукової роботи Павло Марущак, який передав вітання учасникам від ректора університету Миколи Митника та окреслив основні напрямки розвитку прикладної механіки, її високу цінність для суспільства, а особливо для прикладних технологічних рішень.

Пленарне засідання розпочалося доповіддю проф. Володимира Дзюри «Оцінювання експлуатаційних властивостей поверхонь з регулярними мікрорельєфами», яка була присвячена розвитку наукових основ комплексного забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» і, відповідно, їх зносостійкості й маслоємності технологічними методами на основі аналізу умов експлуатації.

Наступну доповідь «Електрошлакове зварювання титану з електромагнітним впливом на

кристалізацію металу шва» виголосив с.н.с. Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України Віталій Порохонько. Доповідь викликала значну зацікавленість присутніх та дискусію щодо оптимізації режимів електромагнітного впливу.

Завершальною у пленарному засіданні була доповідь працівників Запорізького національного університету «Нанесення захисних покриттів для підвищення терміну експлуатації електродів руднотермічних печей», яку представила доц. Ганна Лаптева.

Після завершення пленарного засідання робота конференції продовжилась у 7-ми секціях.

Всього за два дні роботи було заслухано 112 наукових доповідей. Серед них 15 доповідей було представлено науковцями з Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона. Матеріали найкращих доповідей будуть опубліковані у фахових журналах, які входять в наукометричну систему SCOPUS.

Загалом I Міжнародна науково-технічна конференція «Прикладна механіка» стала однією з наймасштабніших за останній період у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

У завершальній промові декан факультету «Інженерії машин, споруд та технологій» к.т.н. доц. Роман Лещук відзначив високу організацію проведення конференції та наголосив, що Міжнародна науково-технічна конференція «Прикладна механіка» буде проводитись кожні два роки, а її проведення стане традицією.

Віталій Порохонько

