

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

04 2020

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Лобанов Л.М., Пащин М.О., Тимошенко О.М., Гончаров П.В., Міходуй О.Л., Шиян К.В. Підвищення довговічності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6 3

Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В., Половецький Є.В. Особливості отримання металевих шаруватих композиційних матеріалів на алюмінієвій основі 11

Книш В.В., Соловей С.О., Ниркова Л.І., Кот В.Г., Гришанов А.О. Вплив високочастотної проковки та атмосфери морського клімату на циклічну довговічність таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами 22

Хаскін В.Ю., Коржик В.М., Бернацький А.В., Войтенко А.М., Ілляшенко Є.В., Саї Д. Особливості прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталі SUS304 з використанням випромінювання дискового лазера 29

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Юрженко М.В., Кораб М.Г., Колісник Р.В., Масючок О.П., Андреев А.В., Петропольський В.С. Зварювання термопластичних полімерних композитів в авіаційній промисловості (Огляд) 34

Маградзе Эр. О старейшей технологии пайки на примере археологических находок – золотого кубка из Триалети и муфеля из Квачхели..... 41

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

Інституту зварювання Польщі – 75 років!..... 47

ХРОНІКА

Збори, присвячені 150-річчю від дня народження Є.О. Патона..... 50

ІНФОРМАЦІЯ

По закордонним журналам 55

TransTig 170/210: розширений набір можливостей TIG та MMA з мінімізацією витрат 59

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Tymoshenko O.M., Goncharov P.V., Mikhoduj O.L., Shiyen K.V. Increase in the life of welded joints of AMg6 aluminum alloy 3

Falchenko Yu.V., Petrushinets L.V., Polovetskii E.V. Peculiarities of producing layered metal composite materials on aluminum base 11

Knysh V.V., Solovei S.O., Nyrkova L.I., Kot V.G., Grishanov A.O. Influence of high-frequency peening and atmosphere of marine climate on the cyclic life of T-welded joints with surface fatigue cracks 22

Khaskin V.Yu., Korzhyk V.M., Bernatskii A.V., Voitenko O.M., Ilyashenko Y.V., Cai D. Features of synergistic effect manifestation in laser-plasma welding of SUS304 steel, using disc laser radiation 29

INDUSTRIAL

Iurzhenko M.V., Korab M.G., Kolisnyk R.V., Masiuchok O.P., Andreev A.S., Petropolsky V.S. Welding of thermoplastic polymer composites in the aviation industry (a review) 34

Magradze Er. About the oldest technology of brazing on the example of archaeological findings – a golden cup from Trialeti and mufel from Kvatskheli 41

BRIEF INFORMATION

Institute of Welding of Poland – 75 years! 47

NEWS

Meeting dedicated to the 150th anniversary of E.O. Paton 50

INFORMATION

According to foreign welding journals 55

TransTig 170/210: Extended TIG and MMA features with minimization costs 59



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Засновники

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

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 182, 191, 192, 263.
Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Передплата

Передплатний індекс 70031.

12 випусків на рік (видається щомісячно).

Друкована версія: 2400 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделорією.

Електронна версія: 2400 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).

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

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150,
11 Kasymyr Malevych Str.
Tel.: (38044) 200 6302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 182, 191, 192, 263.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration
of KV 4788 dated 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Subscription

Subscription index 70031.

12 issues per year (issued monthly), back issues available.
\$180, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$150, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

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

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

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМГ6

Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.М. Тимошенко, П.В. Гончаров, О.Л. Міходуй, К.В. Шиян

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

Досліджували вплив електродинамічної дії на довговічність зварних з'єднань з алюмінієвого сплаву АМГ6 при циклічному навантаженні. Встановлено, що електродинамічна обробка зразків стикових зварних з'єднань сплаву АМГ6 призводить до зниження рівня залишкових зварювальних напружень розтягу, що супроводжується їх переходом в стискання. Показано, що в результаті двосторонньої одноканальної електродинамічної обробки поверхні зварних з'єднань сплаву АМГ6 циклічна довговічність підвищується втричі у порівнянні з початковою. Додаткова електродинамічна обробка лінії сплавлення підвищує довговічність в п'ятеро у порівнянні з необробленим металом. При порівняльній оцінці одно- і двоканальної електродинамічної обробки зразків встановлено, що підвищення довговічності при використанні двоканальної схеми (в порівнянні з одноканальною) визначається керованою синхронізацією складових електродинамічного впливу, що виключає проходження імпульсу електричного струму через оброблюваний метал в фазі його затухання. Показано, що довговічність зразків, які оброблені по двоканальній схемі, при електроімпульсній дії, більш ніж на 50 % вище, ніж при динамічній, що пов'язано з внеском електропластичного ефекту в зниження рівня залишкових зварювальних напружень. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 5

Ключові слова: електродинамічна обробка, електродний пристрій, одно- і двоканальна схема, залишкові зварювальні напруження, алюмінієві сплави, довговічність, імпульс електричного струму, амплітуда циклу

Використання сучасних суднокорпусних і транспортних зварних конструкцій із сплавів на основі алюмінію потребує нових підходів до підвищення їх довговічності. Рішення проблеми гальмування розвитку втомного руйнування є актуальним для продовження ресурсу як нової, так і техніки, яка експлуатується [1].

Існує ряд ефективних способів підвищення опору втомі конструкційних матеріалів, заснованих на наведенні полів напружень стиску в зоні прогнозованого руйнування, до яких можна віднести високочастотну механічну проковку [2]. До способів підвищення втоми, що базуються на зниженні концентрації напружень, можна віднести обробку вершини тріщини імпульсними електромагнітними полями різної тривалості і конфігурації [3].

Одним з методів електроімпульсних впливів на зварні з'єднання є електродинамічна обробка (ЕДО) [4], результатами якої є зниження рівня залишкових зварювальних напружень розтягу, що супроводжується формуванням в зоні обробки шару металу з подрібненою структурою. Аналіз результатів [1-4] дає підстави вважати, що ЕДО може бути ефективним способом підвищення довговічності зварних з'єднань. В даний час відсутні дані про оцінку впливу ЕДО на довговічність зварних з'єднань.

Метою роботи було дослідження впливу електродинамічних дій на довговічність зварних з'єднань з алюмінієвого сплаву АМГ6 при циклічному навантаженні.

ЕДО зварного з'єднання виконували при використанні одноканальної і двоканальної схем електродного пристрою (ЕП).

Одноканальний електродний пристрій. Конструктивна схема одноканального ЕП представлено відповідно на рис. 1. ЕП забезпечує електричний контакт між розрядним контуром і оброблюваним металом по одному каналу, через який в останній вводиться імпульс електричного струму – ВЕТ. ЕП забезпечує можливість регулювання динамічного та електроімпульсного впливу електрода на метал. Робочим органом ЕП є електрод 1 (рис. 1, а), який закріплено в корпусі з латуні 2 гвинтом 3. Робоча поверхня електрода, яка контактує з металом 22, полірована і має радіус закруглення 15 мм. Корпус 2, жорстко пов'язаний з мідним 8 і сталевим (нержавіюча сталь) 7 дисками товщиною 3 і 5 мм, спільно з електродом 1 входять до складу ударного механізму (УМ).

УМ закріплений в двох тефлонових підшипниках ковзання 11, які дозволяють йому рухатися у вертикальному напрямку. Запобігання обертання УМ навколо власної вертикальної осі забезпечують два гвинта 4, які переміщуються в вертикальних канавках кільця 5.

Диски пов'язані з обоймою 12, в якій знаходиться котушка індуктивності 10, намотана мідною шиною 6,2×1,5 мм і має 18 витків. Між

мідним диском і обмоткою, завдяки геометрії обойми, витримується немагнітний зазор величиною 0,5 мм. Індуктивність котушки становить 14,66 мкГн. Обойма 12 закріплена на основі 13 гвинтами 20. Знизу до основи 13 гвинтами 21 і гайками 9 прикріплена нижня кришка 6, на внутрішній поверхні якої розташована гумова прокладка, призначена для демпфування електродинамічного удару по нижній кришці, коли електрод не спирається на метал. Для підключення ЕП до джерела імпульсного струму зверху на основі 13 розташовані клеми 16 і 17 (рис. 1, б). За допомогою клеми 16 здійснюється підведення імпульсного електричного струму (ІЕС) I до ударного механізму через гнучкий провід 15, а клемою 17 – комутація обмотки.

Одноканальний ЕП має два варіанти включення:

1) реалізація взаємодії електроімпульсного I і динамічного P впливів – ІЕС $I + P$;

2) вплив тільки динамічного навантаження P – ІЕС P (рис. 1, а).

Принцип роботи одноканального ЕП. При взаємодії I і P до одного з виводів обмотки клеми 17 підключається плюсовий провід від джерела імпульсного електричного струму, інший вивід обмотки підключається клемою 16 до ударного механізму, а мінусовий дріт від джерела імпульсного електричного струму (ДІЕС) – до оброблюваного металу 22. Схема протікання ІЕС $I + P$ показана суцільною стрілкою на рис. 1, а. При динамічному впливі провід від ДІЕС підключається до двох виводів клеми 17, а клема 16 не підключається. При цьому ІЕС P протікає у напрямку, який позначено пунктирною стрілкою на рис. 1, а. Дроти закріплені фіксатором 18, який кріпиться до основи 13 гвинтами 19. Зверху клемний відділ закритий кришкою 14, яка прикріплена до основи гвинтами 20, 23 і гайками 9.

Робота ЕП здійснюється наступним чином. ЕП впирається в метал торцем електрода і ви-

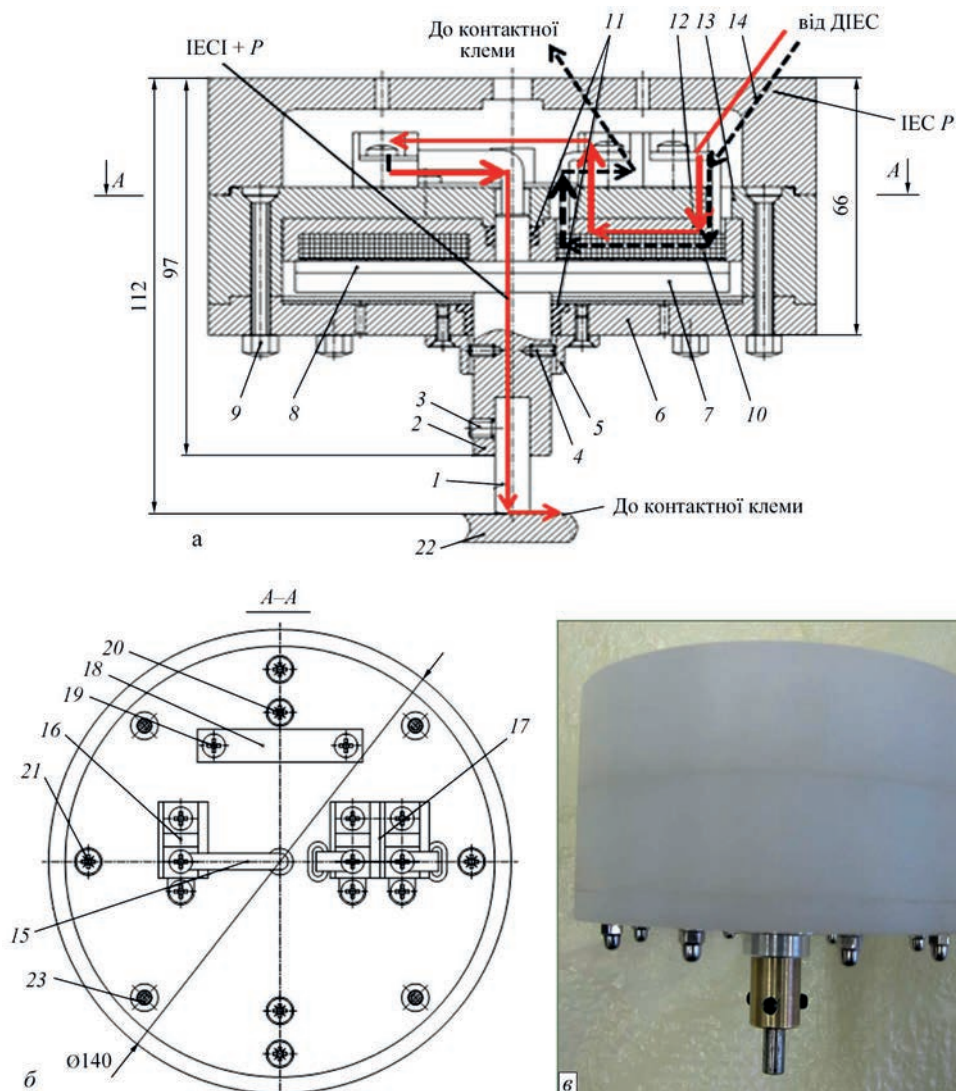


Рис. 1. Конструктивна схема одноканального електродного пристрою (ЕП) для ЕДО (пояснення в тексті): а – вигляд збоку, стрілками показано напрямки ІЕС; б – вид зверху; в – одноканальний ЕП для ЕДО

ставляється по нормалі до поверхні обробки. Для нормальної роботи ЕП з метою запобігання іскроутворення і оплавлення в місці контакту «електрод–метал» перед подачею ІЕС потрібно забезпечити гарантоване притиснення електрода до поверхні обробки.

При правильному позиціонуванні ЕП зусилля навантаження передається від обойми через ударний механізм на вольфрамовий електрод і призводить до притиснення електрода до поверхні металу. При протіканні ІЕС через котушку індуктивності I_0 в диску 8 наводяться вихрові струми, які забезпечують спочатку відштовхування диска від котушки, а потім в кінці імпульсу – притягання до неї.

Переваги одноканального ЕП. Конструкція одноканального ЕП, що базується на схемі прямого пропускання ІЕС, має ряд переваг, до яких можна віднести простоту виготовлення пристрою і мінімальні втрати енергії в ньому при роботі джерела імпульсного струму в розрядному циклі. Особливостями конструкції ЕП з прямим пропусканням ІЕС через індуктор і електрод є менша тривалість імпульсу динамічного навантаження P в порівнянні з ІЕС – I (рис. 2, *а*), а також відсутність можливостей для керованої синхронізації електроімпульсного і динамічного впливів. Це звужує можливості управління процесом ЕДО, але компенсується простотою виготовлення і експлуатації ЕП.

З позицій електродинаміки ЕП із оброблюваним зварним з'єднанням, який включений в розрядне коло з джерелом живлення, представляється у вигляді магнітно-зв'язаних контурів, в первинне коло одного з яких включено ємнісний накопичувач енергії.

Двоканальний електродний пристрій. З метою усунення недоліку, властивого магнітно-пов'язаним контурам, розроблено і виготовлено двоканальний ЕП на базі магнітно-розв'язаних конту-

рів, який включає два незалежні канали ІЕС I та ІЕС P . Перший канал формує ІЕС P (рис. 2, *б*), який призначений для створення динамічного тиску на зону обробки і подається на котушку індуктивності ЕП. Другий канал формує ІЕС I (рис. 2, *б*), узгоджений за тривалістю з періодом динамічного тиску на зону обробки. ІЕС I подається безпосередньо на електрод ЕП і може передаватися в оброблюваний виріб. При цьому схема ЕП дозволяє відключати другий канал (ІЕС I) і передавати на виріб тільки динамічний тиск. Електричне коло другого каналу замикається через контактний кабель, який закріплюється на виробі.

Конструктивна схема двоканального ЕП. Конструктивно двоканальний ЕП (рис. 3, *а*) складається з електрода 1 , закріпленого в обоймі 3 пристроями фіксації 2 і 20 . Обойма з'єднана з диском з неферомагнітного матеріалу 16 , який спирається на каркас 6 з розміщеною в ньому котушкою індуктивності 14 з вбудованим плоским індуктором 15 . Котушка закріплена на каркасі гвинтами 11 . Нижня стінка каркаса 4 , закріплена гвинтами 5 , виконує роль немагнітної підкладки під диском і демпфером 17 . Верхня (захисна) кришка 9 каркаса закріплена в корпусі ЕП гвинтами 8 . Підведення ІЕС I до котушки здійснюється проводом 7 . Замикання розрядного контуру, що забезпечує підведення ІЕС I до оброблюваного металу 18 здійснюється клемою 19 . ІЕС P проходить через котушку по дротах $12, 13$. Підводи $7, 12, 13$ ЕП з'єднані з зовнішніми колами контактними клемами 10 .

Принцип дії двоканального ЕП. Робота двоканального ЕП при ЕДО здійснюється наступним чином. При протіканні імпульсного струму через котушку збуджується магнітне поле, яке ініціює в диску вихрові струми. Взаємодія наведених струмів з магнітним полем, яке їх ініціювало, призводить до виникнення електродинамічної сили. В першій фазі впливу електродинамічна сила притискає електрод до оброблюваного матеріалу, а в

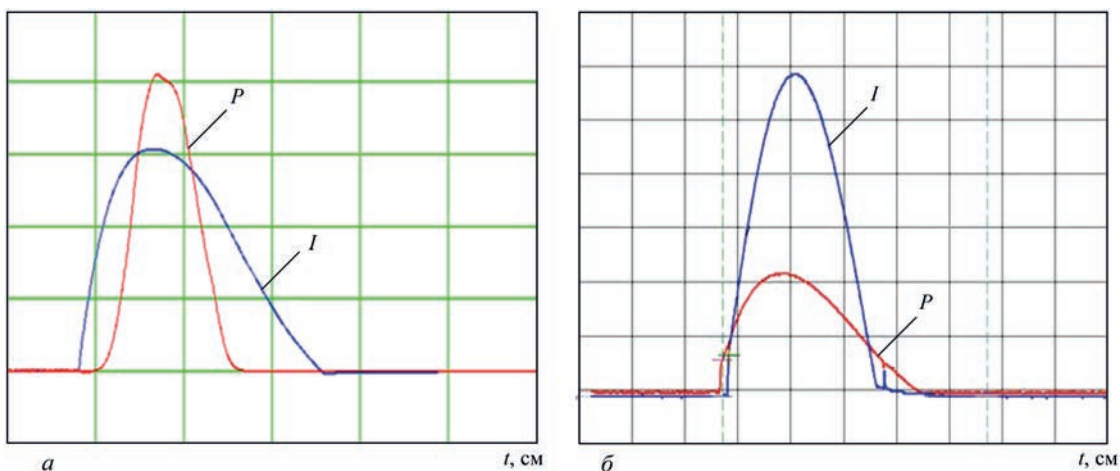


Рис. 2. Осцилограми динамічного тиску P та імпульсного струму I , який проходить через метал, що оброблюється, при одноканальній (*а*) та двоканальній (*б*) схемах ЕП

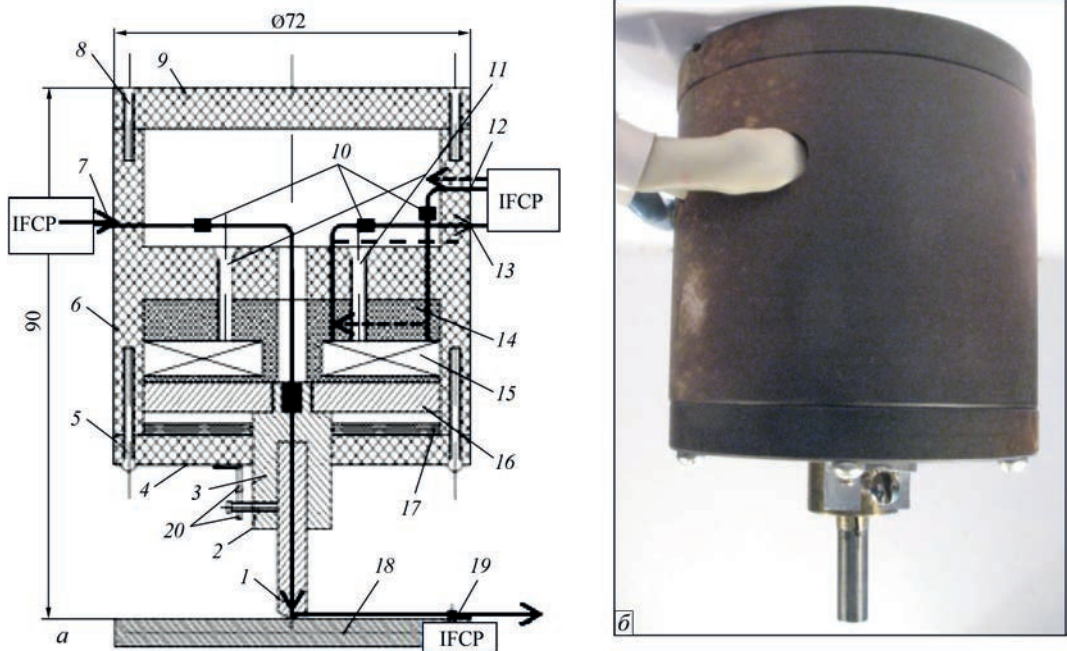


Рис. 3. Двоканальний електродний пристрій (ЕП) для ЕДО з незалежними каналами ІЕС: а – конструктивна схема, де стрілками показано напрямки ІЕС І та ІЕС Р (пояснення в тексті); б – зовнішній вигляд ЕП

другий напрямок силового впливу змінюється на протилежний – електрод відштовхується від оброблюваного матеріалу. Вплив імпульсного струму на зону обробки по тривалості не перевищує тривалість зусилля притискання (див. рис. 2, б). Конструкція ЕП підпорядкована вимогам погодженої тривалості імпульсів і виключення електроіскрових явищ в зоні обробки. Управління каналами в ЕП реалізовано на трьох мікроконтролерах та програмованій логіці, що дозволяє регулювати параметри імпульсів струму (амплітуду), затримку одного імпульсу по відношенню до іншого, візуалізувати параметри імпульсів на світловому дисплеї. Тривалість імпульсів по обох каналах визначається параметрами електричного кола розрядних контурів і може змінюватися дискретно шляхом додавання/зменшення їх індуктивності.

Переваги двоканального ЕП. Для забезпечення нормального режиму роботи ЕП, який виключає іскроутворення і оплавлення в місці контакту «електрод–зразок», визначали величину статичного завантаження, що забезпечує надійний струмовий контакт електрода з оброблюваною поверхнею. З цією метою створювали гарантоване статичне притиснення електрода І ЕП (рис. 1, а) до зовнішньої поверхні зразка 22, для чого використовували зварне з’єднання, показане на рис. 4. Від сили притиснення F_y істотно залежить величина електричного опору контакту «електрод-зразок» R_k . Для оцінки впливу F_y на зміни R_k , проводили вимірювання значень R_k , варіюючи F_y в діапазоні від 2 до 150 Н. З цією метою на зовнішню поверхню кришки 14 ЕП (див. рис. 1, а) встановлювали вантажі різної маси, а зміни значень R_k реєстрували на ділянці розряд-

ного контуру між електродом І та зразком 22, використовуючи вимірювальний міст (LC-метр) марки BR2876-5. Залежність опору контакту R_k від сили F_y статичного притискання електрода до зразка представлено в табл. 1, з якої видно, що при збільшенні F_y від 2 до 40 Н величина опору R_k інтенсивно знижується з 90 до 13 мОм. При подальшому збільшенні F_y до 150 Н R_k лінійно знижується до 10 мОм. Із даних табл. 1 можна зробити висновок, що збільшення F_y понад 40 Н незначним чином впливає на зміну опору в зоні контактної взаємодії. Це визначило вибір в подальших експериментах значення F_y , яке знаходилось в діапазоні 50...80 Н.

Дослідження впливу ЕДО на опір втомі зразків зварних з’єднань сплаву АМг6. Зразки товщиною $\delta = 2$ мм (рис. 5) виконувалися автоматичним зварюванням TIG(Ar) при напрузі дуги $U_{зв} = 20$ В, зварювальному струмі $I_{зв} = 170$ А і швидкості зварювання $v_{зв} = 5,5$ мм/с. Методом електронної спекл-інтерферометрії [5] до і після ЕДО визначали значення залишкових зварювальних напружень у центральному поздовжньому перетині зразка, відповідному лінії А-А на рис. 5. ЕДО виконували в напрямку «від центру до країв» (стрілка на рис. 5), застосовуючи електродний пристрій (ЕП), укомплектований вольфрамовим електродом марки ВЛ з напівсферичним робочим торцем, а режим ЕДО забезпечував запасену енергію накопичувача E_3 до 600 Дж при одноразовому електродинамічному впливі.

Таблиця 1. Залежність опору контакту R_k від сили статичного притиснення електрода до зразка F_y

F_y , Н	2	3	10	15	22	40	80	150
R_k , мОм	90	40	25	20	15	13	12	10

Обробку зразків виконували електродним пристроєм в умовах «жорсткого закріплення», для реалізації якого перед ЕДО обидві сторони зразка (рис. 5) «жорстко» фіксували розподіленим навантаженням на складальній плиті, виключаючи можливі кутові деформації зразка. Така схема фіксації оброблюваного металу, згідно [6], забезпечує максимальну ефективність електродинамічного впливу, при інших рівних параметрах режиму ЕДО. Обробку проводили при значенні індуктивності ЕП – $L = 5,3$ мкГн і енергії $E_z < 1$ кДж. При виборі значень зарядної напруги U для двох схем ЕДО базувались на тому, що значення U_{I+P} для одноканальної схеми і сумарне $U_I + U_P$ – для двоканальної, повинні бути рівними. Так, при одноканальній схемі використовували режим ЕДО, що задається $U_{I+P} = 570$ В ($I = 5,75$ кА) для ІЕС $I + P$, а при двоканальній – $U_P = 200$ В ($I_p = 1,45$ кА) для ІЕС P і $U_I = 370$ В ($I_I = 4,3$ кА) для ІЕС I .

Для реалізації електродинамічного впливу на робочу частину зразка в зоні ЕДО встановлювали ЕП і забезпечували його гарантований електричний контакт з оброблюваною поверхнею при замиканні розрядного контуру. Включення силового ключа ініціювало розряд ємнісного накопичувача енергії через ЕП в оброблюваний матеріал. В процесі виконання ЕДО серією ІЕС, ЕП переміщували по поверхні оброблюваної ділянки зразків в напрямку «від центру – до країв» (стрілка на рис. 5) з кроком $3 \dots 5$ мм. У кожному циклі ЕДО виконували до 35 електродинамічних впливів, що забезпечувало рівномірне поверхневе електропластичне деформування оброблюваної ділянки шва (лінії сплавляння) довжиною 90 мм. Реалізовували різні схеми обробки зразків по одно- (рис. 1) і двоканальній (рис. 3) схемам ЕДО, які виконувались з боку зовнішньої поверхні шва і лінії сплавляння, а також з боку кореня шва.

Проводили втомні випробування зразків, оброблених за різними схемами ЕДО. Використовували машину марки УПМ-02 (рис. 4), що реалізує схему втомних випробувань на вигин (рис. 4, б) при симетричному циклі навантаження з частотою 14 Гц. Амплітуду напружень циклу σ_a задавали в діапазоні $80 \dots 160$ МПа, а навантаження проводили протягом інкубаційного періоду [7] до реєстрації кількості циклів N , що відповідають початку руйнування зразків. Досліджували вплив різних схем ЕДО на циклічну довговічність N зразків.

Аналіз отриманих результатів. Розподіл σ_x до та після двосторонньої ЕДО центру шва по одноканальній схемі представлено в табл. 2. З таблиці вид-

но, що до ЕДО в центрі шва і на лінії сплавляння (в зонах можливого руйнування) пікові значення напружень, що розтягують, близькі до $\sigma_{0,2}$ для сплаву АМг6, після обробки трансформувались в напруження стискання, значення яких досягали -10 МПа.

Значення напружень σ_y в центрі шва і на лінії сплавляння до ЕДО по одноканальній схемі досягали відповідно 12 і 17 МПа. Після ЕДО σ_y трансформувались в напруження стискання, значення яких в центрі шва і на лінії сплавляння досягали відповідно -68 та -56 МПа.

Особливості схем, розташування зон руйнування і значення N представлено в табл. 3. З її даних можна бачити, що в результаті двосторонньої ЕДО зовнішньої поверхні і кореня шва по одноканальній схемі ЕП, циклічна довговічність N зраз-

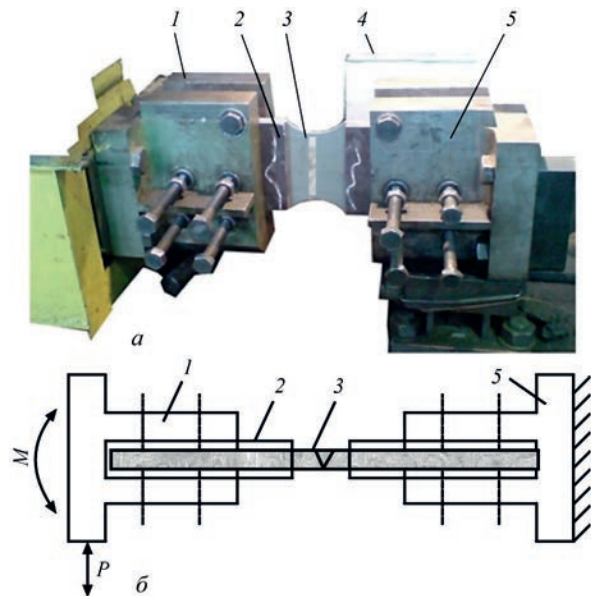


Рис. 4. Втомні випробування зразків зварних з'єднань сплаву АМг6 після ЕДО: а – зовнішній вигляд випробувальної машини УПМ-02 (1 – рухомий затискач; 2 – пластина, яка фіксує; 3 – зразок; 4 – лічильник циклів; 5 – нерухомий затискач); б – схема випробувань; P – горизонтальне навантаження; M – згинальний момент

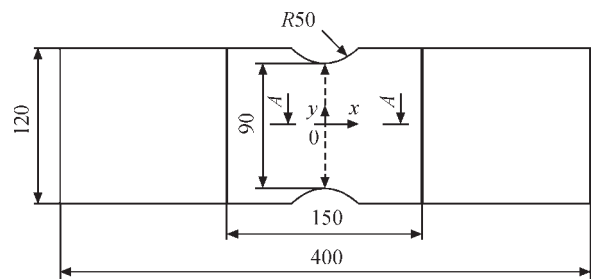


Рис. 5. Схема зразків зварного з'єднання зі сплаву АМг6 для втомних випробувань, де штрихова стрілка – напрямок ЕДО, А-А – переріз, в якому визначались напруження σ_x та σ_y

Таблиця 2. Розподіл σ_x до та після ЕДО (рис. 5) по одноканальній схемі

X , мм	0	5	11	16	25	36	46	56	66	76
σ_x до ЕДО, МПа	120	130	100	40	-40	-38	-28	-21	-18	-10
σ_x після ЕДО, МПа	-8	-9	-10	-10	5	18	15	11	2	-7

ків зварних з’єднань в досліджуваному діапазоні σ_a підвищується втричі (рядки 4, 7, 8) в порівнянні з вихідною (рядки 1–3). При цьому руйнування як вихідних зразків, так і оброблених, відбувається по лінії сплавлення. Дані табл. 3 для одноканальної схеми підтверджують результати випробувань на втому, які представлені в табл. 4.

Додаткова ЕДО основного металу на відстані 10 мм за лінією сплавлення (рядок 5) забезпечує більш розвинену зону напружень стискання в області прогнозного руйнування зразків. Збільшення зони стискання, яка створена в околі зварного з’єднання, не впливає на довговічність N . У той же час попереднє циклічне навантаження зразків до досягнення $N_1 = 400000$ перед виконанням ЕДО (рядок 6) призводить до підвищення довговічності N . При порівнянні даних рядків 6 та 1 табл. 3 можна бачити, що попереднє циклічне стимулювання зразків підвищує показники довговічності втричі. Даний факт можна пояснити додатковою релаксацією залишкових зварювальних напружень, яка забезпечується попередніми ци-

клічним навантаженням зразків до значення N_1 . Таким чином, ефективність ЕДО може бути підвищена при обробці зварних з’єднань, що експлуатуються при циклічних навантаженнях, у порівнянні із виготовленими.

Застосування двосторонньої ЕДО з використанням двоканальної схеми ЕП позитивно впливає на довговічність N , значення якої при $\sigma_a = 160$ МПа після односторонньої і двосторонньої ЕДО шва підвищуються відповідно на 6 і 15 % (рядки 11 і 12 в табл. 3) в порівнянні з одноканальною (рядок 8). Зона руйнування при цьому зміщується в основний метал на 5...10 мм від лінії сплавляння. Порівняння рядків 8 і 12 є цікавим з огляду на той факт, що підвищення N при використанні двоканальної схеми досягалося за рахунок реалізації в два рази меншої кількості впливів, ніж при одноканальній (виключена ЕДО з боку кореня шва).

Додаткова ЕДО лінії сплавляння (рядок 13) вдвічі підвищує значення N у порівнянні з одноканальною обробкою тільки шва (рядок 8) та вп’ятеро у порівнянні з вихідною (рядок 3). Підвищення

Таблиця 3. Значення довговічності N при різній амплітуді цикла $2\sigma_a$ зварних з’єднань сплаву АМгб після ЕДО при одно- та двоканальній схемі ЕП

Номер серії зразків	Схема ЕДО	$2\sigma_a$, МПа	N	Зони руйнування
1	Без ЕДО	80	525600	По лінії сплавлення
2	-"-	120	210600	-"-
3	-"-	160	151200	-"-
4	Одноканальна, двостороння (шов + корінь)	80	1004800	-"-
5	Одноканальна, двостороння (шов + корінь + ОМ з двох сторін на відстані 10 мм від лінії сплавлення)	80	970000	Основний метал (ОМ) за 2 мм від лінії сплавлення
6	Аналогічно № 5, перед ЕДО зразок навантажувався $N_1 = 400000$ при $\sigma_a = 80$ МПа	80	932000, з врахуванням N_1 -1332000	По лінії сплавлення
7	Одноканальна, двостороння	120	568000	-"-
8	-"-	160	360600	-"-
9	Двоканальна: ІЕС I + ІЕС P (двостороння)	80	1169320	ОМ за 5 мм від лінії сплавлення
10	Двоканальна: ІЕС P (двостороння)	80	752400	По лінії сплавлення
11	Двоканальна ІЕС I + ІЕС P (одностороння-шов)	160	382000	ОМ за 10 мм від лінії сплавлення
12	Двоканальна: ІЕС I + ІЕС P (двостороння)	160	414000	Центр шва
13	Двоканальна: ІЕС I + ІЕС P (двостороння – шов+ лінія сплавлення)	160	718000	По лінії сплавлення

Таблиця 4. Результати випробувань на втому зразків зварних з’єднань сплаву АМгб (рис. 4) при $\sigma_a = 80, 120$ н 160 МПа в координатах $2\sigma_a - N$ для одноканальної схеми

Вихідний стан – до ЕДО							
N	520000	470000	460000	210000	150000	130000	140000
$2\sigma_a$, МПа	80	80	80	120	160	160	160
Після ЕДО							
N	1000000	1050000	1040000	560000	360000	390000	392000
$2\sigma_a$, МПа	80	80	80	120	160	160	160

значень N при використанні двоканальної схеми можна пояснити особливостями керованої синхронізації складових електродинамічного впливу, що виключає проходження ІЕС через оброблюваний метал в фазі притягання диску 16 до котушки 14 (рис. 3, а). При цьому виключається термічний вплив ІЕС в період розриву електричного контакту розрядного кола, що призводить до зміцнення обробленого металу до рівня вище основного. Наслідком цього є зміщення зони руйнування від лінії сплавлення в основний метал, що відображено в табл. 3 (рядки 9, 11).

Вивчали вплив струмової складової електродинамічного впливу (ІЕС I) на довговічність N зварних з'єднань при ЕДО по двоканальній схемі ЕП. З цією метою досліджували зразки, які оброблені в умовах взаємодії електроімпульсного і динамічного впливів (ІЕС I + ІЕС P – рядок 9), а так само тільки при динамічному впливі (ІЕС P – рядок 10). З даних табл. 3 випливає, що значення N в умовах взаємодії більш ніж на 50 % вище, ніж при динамічному навантаженні. Даний факт можна пояснити внеском струмової складової ЕДО, що ініціює вклад електропластичного ефекту (ЕПЕ) [8] в зниження рівня залишкових зварювальних напружень. Вплив напружень на довговічність N особливо значний при багатоцикловому навантаженні, якому відповідає $2\sigma_a = 80$ МПа. Фактором, що визначає підвищення N при реалізації ЕПЕ, є також деформаційне зміцнення шва на основі електростимулювання, що пояснює зміщення зони руйнування від лінії сплавлення в основний метал.

Слід зазначити, що саме при малій амплітуді циклу $2\sigma_a = 80$ МПа рівень залишкових зварювальних напружень найбільш впливає на величину N . При порівнянні вихідної N (рядок 1) з її значеннями, отриманими після ЕДО по одно- (рядок 5) та двоканальній (рядок 9) схемам ЕП, можна бачити домінування останньої в якості інструменту, що забезпечує найбільше підвищення N . В той же час попереднє циклічне навантаження, що сприяє зниженню рівня залишкових зварювальних напружень до початку ЕДО, забезпечує підвищення N у порівнянні зі зразками, обробленими без попереднього силового впливу. Даний факт дає підстави вважати, що попереднє навантаження є фактором підвищення довговічності зварних з'єднань при використанні ЕДО, що в перспективі може служити предметом спеціальних досліджень.

При порівнянні впливу на довговічність ЕДО по двоканальним схемами ЕП, що реалізують вплив ІЕС I (рядок 10) та ІЕС I + ІЕС P (рядок 9), можна побачити, що внесок дії струму збільшує N . При цьому збільшення вкладу струмової складової в електродинамічний вплив, яке виконано за схемою ІЕС I + ІЕС P та інтенсифікує прояв елек-

тропластичного ефекту, представляється перспективним і досить просто реалізованим на розглянутій елементній базі.

Проведені дослідження показали ефективність ЕДО сплаву АМг6 і його зварних з'єднань з метою підвищення опору руйнуванню при циклічних навантаженнях в умовах симетричного вигину. Застосування ЕДО основного металу [6], зварних з'єднань, а також елементів тонколистових конструкцій в зоні очікуваних руйнувань дозволить підвищити експлуатаційний ресурс виготовлених і експлуатованих виробів, що працюють в умовах циклічних навантажень.

Висновки

1. Показано, що електродинамічна обробка (ЕДО) зразків стикових зварних з'єднань сплаву АМг6 призводить до зниження рівня залишкових зварювальних напружень розтягу, що супроводжується їх переходом в напруження стиску.

2. Встановлено, що в результаті двосторонньої одноканальної ЕДО поверхні зварних з'єднань сплаву АМг6 циклічна довговічність підвищується втричі у порівнянні з вихідною. Додаткова ЕДО лінії сплавлення підвищує довговічність в п'ятеро у порівнянні з необробленим металом.

3. За результатами порівняльної оцінки одноканальної і двоканальної ЕДО зварних з'єднань сплаву АМг6 встановлено, що підвищення довговічності при використанні двоканальної схеми (в порівнянні з одноканальною) визначається керованою синхронізацією складових електродинамічного впливу, яка виключає проходження ІЕС в фазі його загасання через метал, що оброблюється.

4. Встановлено, що довговічність зразків, які оброблені по двоканальній схемі, при електроімпульсній дії, більш ніж на 50 % вище, ніж при динамічній дії, що пов'язано з внеском електропластичного ефекту в зниження рівня залишкових зварювальних напружень.

Список літератури

1. Кныш В.В. (2000) Определение циклической долговечности элементов конструкций при торможении усталостных трещин. *Автоматическая сварка*, **9-10**, 73–75.
2. Кныш В.В., Клочков И.Н., Пашуля М.П., Мотрунич С.И. (2014) Повышение сопротивления усталости тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой. *Там же*, **5**, 22–29.
3. Финкель В.М., Иванов В.М., Головин Ю.И. (1983) Залечивание трещин в металлах скрепленным электрическим и магнитным полями. *Проблемы прочности*, **4**, 54–58.
4. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Соломийчук Т.Г. и др. (2012) Изменения структуры алюминиевого сплава АМг6 при электродинамических воздействиях. *Вісник українського матеріалознавчого товариства*, **5**, 30–42.
5. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкции с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **1**, 10–13.

6. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of Electrodynamic Treatment on the Fracture Resistance of the AMg6 Aluminum Alloy Under Cyclic Loading. *Strength of Materials*, **3**, 91–98.
7. Яковлева Т.Ю. (2003) *Локальная пластическая деформация и усталость металлов*. Киев, Наукова думка.
8. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы*. Москва, МГИУ.
3. Finkel, V.M., Ivanov, V.M., Golovin, Yu.I. (1983) Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields. *Problemy Prochnosti*, **4**, 54–58 [in Russian].
4. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Solomijchuk, T.G. et al. (2012) Changes of structure of AMg6 aluminium alloy in electrodynamic effects. *Visnyk Ukrainskogo Material. Tovarystva*, **5**, 30–42 [in Russian].
5. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **1**, 10–13.
6. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the AMg6 aluminium alloy under cyclic loading. *Strength of Materials*, **3**, 91–98.
7. Yakovleva, T.Yu. (2003) *Local plastic deformation and fatigue of metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Baranov, Yu.V., Troitsky, O.A., Avramov, Yu.S. (2001) *Physical principles of electropulsed and electroplastic treatments and new materials*. Moscow, MGIU [in Russian].

References

INCREASE IN THE LIFE OF WELDED JOINTS OF AMG6 ALUMINUM ALLOY

L.M. Lobanov, M.O. Pashchyn, O.M. Tymoshenko, P.V. Goncharov, O.L. Mikhoduj, K.V. Shiyan

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The effect of electrodynamic action on the life of welded joints of AMg6 aluminum alloy under cyclic loading was investigated. It was found that electrodynamic treatment of specimens of butt welded joints of AMg6 alloy results in reduction in residual tensile welding stresses, which is followed by their transition to compression. It is shown that as a result of double-sided single-channel electrodynamic surface treatment in welded joints of AMg6 alloy, the cyclic life is three times increased as compared to the initial one. Additional electrodynamic treatment of the fusion line increases the life by five times as compared to the non-treated metal. In the comparative evaluation of single- and two-channel electrodynamic treatment of samples, it was found that the increase in life when using a two-channel scheme (as compared to single-channel) is determined by the controlled synchronization of components of electrodynamic effect, which eliminates the passage of electric current pulse through its treated metal in the phase of its attenuation. It was shown that the life of two-channel treated specimens with electric pulsed action is more than 50% higher than that of the dynamic ones, which is connected with the contribution of electroplastic effect to the reduction of residual welding stresses. 8 Ref. , 4 Tabl. , 5 Fig.

Keywords: electrodynamic treatment, electrode device, single- and two-channel scheme, residual welding stresses, aluminum alloys, life, electric current pulse, cycle amplitude

Надійшла до редакції 13.03.2020

ВЕДУЩАЯ ВЫСТАВКА В МИРЕ
СВАРКА • РЕЗКА • ОБРАБОТКА



LET'S JOIN
THE WORLD!

13.-17. сентября 2021

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ
СЕЙЧАС!

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ МЕТАЛЕВИХ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА АЛЮМІНІЄВІЙ ОСНОВІ

Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, Є.В. Половецький

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

Проведено аналіз публікацій, присвячених отриманню шаруватих композиційних матеріалів на алюмінієвій основі. Досліджено способи з'єднання матеріалів з тонкої фольги, які дозволяють отримувати шаруваті з'єднання з різною кількістю проміжних шарів. Показано, що основними способами зварювання, які дозволяють отримувати з'єднання з шаруватою структурою є прокатка, зварювання ультразвуком, вибухом, дифузійне зварювання та реакційне спікання. Аналіз літератури показав, що процес з'єднання можливо проводити як в умовах вакууму, так і на повітрі. З'єднання фольги з титану та алюмінію на режимах зварювання нижчих за температуру плавлення алюмінію (660 °C) забезпечує отримання з'єднань без формування між шарами інтерметалідної фази. Для збільшення міцності отриманих композитів доцільно використання в процесі зварювання технологічної операції у вигляді пропускання струму або після зварювання термічної обробки шаруватих композиційних матеріалів, що забезпечує підвищення реакційної здатності між шарами алюмінію і титану та утворення в якості продукту реакції інтерметалідної фази. Бібліогр. 31, рис. 7.

Ключові слова: металеві шаруваті композиційні матеріали, методи з'єднання, зона з'єднання, інтерметалідна фаза

При розробці зразків нової техніки висуваються все більші вимоги до її ваги та показників міцності, що обумовлює необхідність розробки нових матеріалів, які б задовольняли цим потребам. До таких матеріалів можна віднести композиційні.

Композиційними (КМ) називають матеріали, до складу яких входять нерозчинні або мало розчинні один в одному компоненти, які суттєво відрізняються за властивостями, та розділені в матеріалі чітко вираженою границею. Властивості КМ в основному залежать від фізико-механічних властивостей компонентів і міцності з'єднання між ними. Відмінною особливістю КМ є те, що в них проявляються переваги компонентів, а не їх недоліки. Разом з тим КМ притаманні властивості, яких не мають окремі компоненти, що входять до їх складу. Для оптимізації властивостей вибирають компоненти, що різко відрізняються, але доповнюють один одного [1].

Властивості КМ залежать від форми та характеру розподілу наповнювача. За геометричною формою наповнювачі поділяють на нульмірні, одномірні та двовимірні (рис. 1). Нульмірні наповнювачі мають розміри одного порядку в трьох вимірах (дисперсно-зміцнені КМ). Одномірні наповнювачі складаються з волокна того чи іншого

перетину (волокнисті КМ), а двовимірні наповнювачі являють собою пластини, довжина яких перевищує їх товщину (шаруваті КМ) [2].

Шаруваті композиційні матеріали (ШКМ) складаються з жорстко з'єднаних металевих або металовмісних шарів, що чергуються. Ці матеріали являють собою унікальну ламіновану структуру з різко вираженими границями розділу та можуть складатися з шарів широкого спектру матеріалів. Шари в композитах, в залежності від товщини, можна класифікувати як листи або пластини з товщиною 1...10 мм і більше, фольги товщиною 0,05...1,0 мм і плівки товщиною 0,001...0,05 мм [3]. ШКМ можуть значно поліпшити ряд властивостей, включаючи в'язкість руйнування, втомні характеристики, ударні характеристики, знос, корозію та демпфуючу здатність, забезпечують підвищену пластичність крихких матеріалів. Вибір матеріалів компонентів та їх об'ємного відсотку, товщини шарів і відповідної обробки дозволяють виготовити матеріал із заданими властивостями [4].

ШКМ з твердою матрицею та м'яким наповнювачем застосовуються, в основному, в якості жаростійких матеріалів, а з м'якою матрицею та твердим наповнювачем як теплостійкі матеріали.

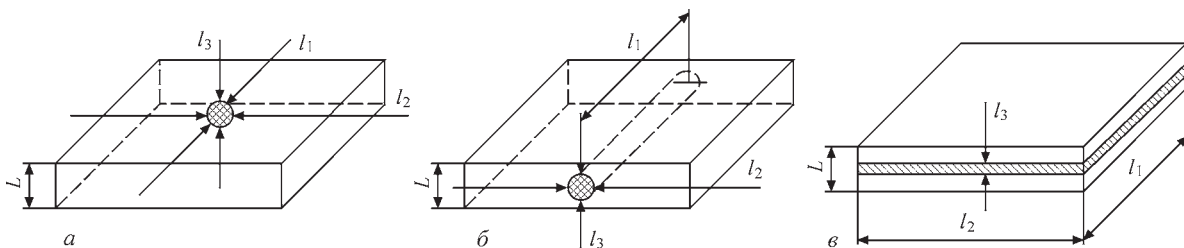


Рис. 1. Форми наповнювачів: а – нульмірні; б – одномірні; в – двовимірні; l_1, l_2, l_3 – розміри наповнювача; L – товщина матриці [2]

Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Петрушинець Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>,

Половецький Є.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8113-0434>

© Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, Є.В. Половецький, 2020

За функціональними ознаками ШКМ поділяються на: корозійностійкі, антифрикційні, електротехнічні, інструментальні, зносостійкі, термобіметали, біметали для глибокої витяжки та побутових виробів [3].

З урахуванням того, що алюміній та титан є одними з найлегших металів і широко застосовуються у різних галузях промисловості, метою цієї роботи було провести аналіз способів отримання ШКМ на основі алюмінію та титану.

Методи отримання ШКМ умовно можна розділити на такі, що формуються в твердому або рідкому стані методами зварювання, а також через газоподібний стан чи розчин методами осадження. До першої групи можна віднести: з'єднання через розплав методом просочення, спікання, прокатки, ультразвукового, дифузійного зварювання, зварювання вибухом. До другої групи входять: газотермічне напилення, випаровування та осадження з парової фази в вакуумі, методи хімічного осадження металу з розчинів.

Розглянемо отримання шаруватих композиційних матеріалів методами зварювання.

Виготовлення ШКМ **методом просочення** (через розплав) передбачає контакт рідкого металу наповнювача з твердим металом матриці. Автори [5] запропонували механізм протікання процесів при взаємодії розплаву алюмінію з твердим титаном (рис. 2), згідно з яким спочатку розплав алюмінію не перебуває у безпосередньому контакті з титаном, бо між ними знаходяться прошарки оксидів Al_2O_3 , TiO_2 (або TiO). Процес дифузії атомів титану та алюмінію через границю розділу при наявності окисних плівок уповільнений, тому переважно він відбувається по розривах в оксидних плівках з утворенням в титані локальних ділянок пересиченого твердого розчину $Ti(Al)$ з подальшим формуванням зародків інтерметаліду Al_3Ti . Далі відбувається поперечне зростання алюмінідів до їх змикання з утворенням суцільної прошарку вздовж титану.

Фрагментація оксидної плівки сприяє збільшенню дифузії атомів алюмінію з розплаву до поверхні титану, сприяючи формуванню та прискореному зростанню зародків інтерметалідної фази. Утворення інтерметаліду в обсязі, обмеженому титаном, що прореагував, призводить до подальшого руйнування оксидної плівки, різкого збільшення внутрішніх напружень і руйнування алюмінідів, що утворилися, на окремі фрагменти та їх витіснення з реакційного об'єму. Це полегшує доступ розплаву алюмінію практично до реакційної поверхні, сприяє прискоренню процесів локалізованого розростання інтерметалідів аж до їх змикання та виникнення суцільної смуги фрагментів алюмінідів, покритих плівкою розплаву алюмінію.

Фрагменти інтерметалідів, що відокремилися, малорухливі та залишаються поблизу реакційної поверхні, від якої відтісняються новими фрагментами, що постійно утворюються.

В роботі [6] досліджували вплив температури рідкої фази на формування ШКМ. В якості матеріалів використовували технічний алюміній А7 і титан ВТ1-0 розміром $40 \times 40 \times 0,5$ мм. Зазор між шарами титану становив $0,125 \dots 0,7$ мм. Титан попередньо травили протягом $5 \dots 10$ хв при $20^\circ C$ в розчині: на 1 л води $20 \dots 30$ мл H_2NO_3 та $30 \dots 40$ мл HCl . Для активації поверхонь використовували флюс системи $KF-AlF_3$. Темпе-

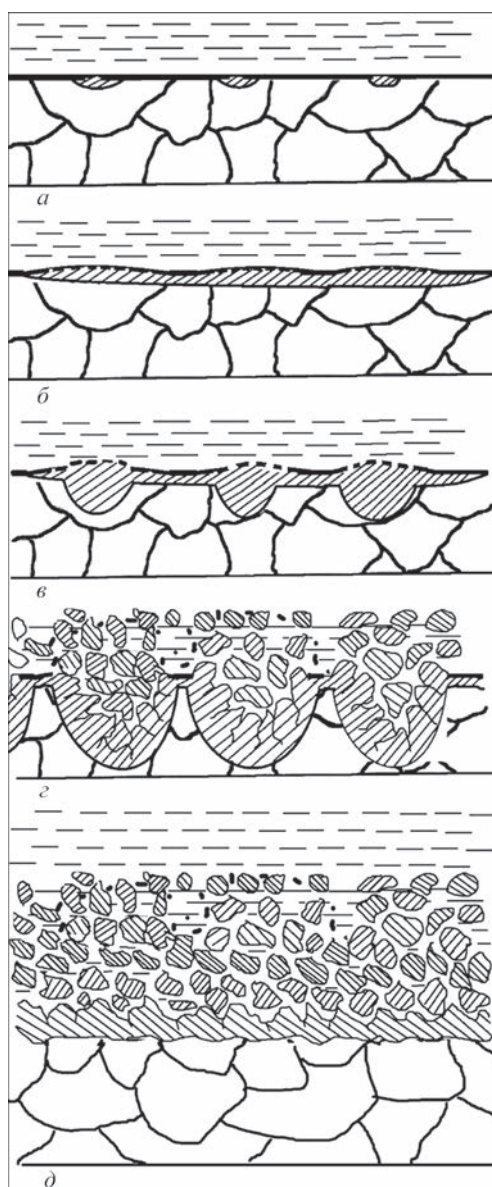


Рис. 2. Механізм трансформації мікроструктури шаруватого композиту ВТ1-0/АД1 в процесі термічної обробки при температурах вище точки ліквідусу алюмінію: а – виникнення зародків алюмінідів; б – поперечне зростання ділянок тонкого прошарку; в – формування та прискорене зростання зародків інтерметалідної фази в зонах каналів між фрагментами оксидної плівки; г – фрагментованість інтерметаліду; д – виникнення суцільної смуги фрагментів інтерметалідів, покритих плівкою розплаву Al [5]

ратуру розплаву алюмінію задавали в діапазоні 670...950 °С. Було встановлено, що рівень змочування практично не змінюється при підвищенні температури розплаву та досягає максимального значення при 700...750 °С. Найвищі значення рівня змочування, а також кращі механічні властивості в усьому досліджуваному діапазоні температур були отримані для з'єднань з зазором між шарами титану 0,35 мм ($\tau \approx 65 \dots 80$ МПа). Під час формування ШКМ між шарами Al та Ti відбувається формування двофазної зони, яка складається з алюмінієвої (Al та до 0,5 % Ti) і титанової (Al_3Ti) фаз. При цьому кількість інтерметалідної фази збільшується з ростом температури процесу. При 800 °С між алюмінієм і титаном утворюється суцільний прошарок Al_3Ti .

При виготовленні ШКМ методом **плазмового спікання** в якості джерела нагріву застосовують імпульсний постійний струм, при цьому матеріал в зоні впливу може розігріватися до високих температур, аж до плазмового стану.

В роботі [7] шаруватий титан-алюмінієвий композит отримували методом плазмового спікання фольги алюмінію та титану товщиною 100 та 200 мкм, відповідно, діаметром 26 мм. Загальна кількість фольги в пакеті становила 70 штук. Процес проводили при температурі 830 °С, тиску 5,7 МПа, тривалості 1...5 хв. Часткове видавлювання розплавленого алюмінію з пакету, а також пластична деформація титану призводять до зменшення товщини зразків на 10...30 %. Після проведення процесу формується шаруватий інтерметалічний композит Ti– Al_3Ti . Збільшення часу витримки до 5 хв дозволяє знизити пористість в шарах алюмінію титану, а також підвищити їх твердість з 2,9 до 3,8 ГПа.

Автори [8] для отримання шаруватої структури також використовували плазмове спікання. Дослідження проводили з фольгою технічно чистого алюмінію та титану з товщиною, відповідно, 27 і 45 мкм, діаметром 15 мм. Фольгу очищали в ультразвуковій ванні в метанолі та складали в пакет з 40 дисків Al та 41 – Ti. Іскрове плазмове спікання проводили в умовах вакууму 10^{-3} Па при постійному струмі 1,0...1,5 кА, напрузі 5...10 В, частота імпульсів змінювалася в діапазоні 30...40 кГц. Попередньо пакет спікали при температурі 450 °С, тиску 50 МПа, витримці 10 хв. Далі проводили відпал при 900 °С протягом 30 хв в атмосфері аргону. Остаточне спікання проводили в інтервалі температур 950...1200 °С зі швидкістю нагріву 100 °С/хв, тиску 50 МПа, при тривалості витримки 10 хв. Після попереднього спікання була отримана шарувата структура без помітної взаємодії між Al і Ti. Після відпалу бінарна структура перетворюється на прошарки: $\alpha-Ti$, $AlTi_3$,

$AlTi$, Al_2Ti та товстий шар пористого Al_3Ti . Причини утворення пор вказуються плавлення Al, ефект Кіркендала та різниця мольних об'ємів між реагентами та продуктами. Другий цикл спікання дозволяє майже цілковито залікувати пори. При температурі процесу 950 °С утворюється наступний склад шарів: $\alpha-Ti$, $AlTi_3$, $AlTi$, $Al_{11}Ti_5$ та Al_3Ti . Подальше підвищення температури призводить до зменшення кількості шарів. Так, при 1050 °С були отримані $\alpha-Ti$, $AlTi_3$, $AlTi$, а при 1200 °С – однорідна суміш $AlTi_3$ з $AlTi$. Також було встановлено, що міцність на вигин шаруватих зразків, отриманих при 950 °С більш ніж втричі вища, ніж тих, які спікали при 1050...1200 °С ($\sigma_{в. виг.} = 1400$ МПа проти $\sigma_{в. виг.} = 389 \dots 446$ МПа). Це пояснюється наявністю шару $\alpha-Ti$, який пластично деформувався та перешкоджав розповсюдженню тріщини в напрямі, перпендикулярному до площини шарів композиту, сприяючи її відхиленню та розгалуженню. Така мікроструктура поглинає велику кількість енергії перед руйнуванням.

В роботі [9] виконували реакційне спікання пакету фольги зі сплавів ВТ00 і А5Е (100×10×0,05 мм). Перший і останній шари були з титану. Загальна товщина пакету становила 1 мм. Фольги попередньо обробляли 2 %-м розчином плавикової кислоти. Пакет укладали між керамічними пластинами та нагрівали до 630 °С в теплостійкому боксі зі швидкістю 15 °С/хв. Струм пропускали з частотою 40, 800 і 1600 Гц. Кращі результати були отримані при пропусканні монополярних імпульсів («–» підключений до шарів Ti, «+» – до Al). Було встановлено, що при нагріванні без пропускання струму повне перетворення пакету в ШКМ Ti– Al_3Ti відбувається за 420...480 хв. Додаткове пропускання струму зменшує час формування шаруватого композиту до 300 хв. У процесі спікання формується тільки інтерметалід Al_3Ti , утворення якого призводить до виникнення пор і мікротріщин на початку хімічного перетворення. До закінчення процесу спікання під дією тиску несущільності заліковуються таким чином, що кінцева структура шаруватого композиту являє собою чергування залишкових шарів Ti товщиною 30...35 мкм і шарів Al_3Ti з мікротвердістю 4,5...7,0 ГПа.

Автори роботи [10] запропонували методику розрахунку параметрів процесу та схему перетворення шарів при виготовленні титан-алюмінієвого ШКМ при пропусканні постійного струму. Фольги алюмінію та титану (90×10×0,05 мм) набирали в пакет загальною товщиною 1 мм. Перший та останній шари були з Ti. Спікання проводили при температурі 630 °С і тиску 25 МПа. На рис. 3 наведено схему трансформації шарів пакету з фольги Al та Ti. В роботі наведено процедуру роз-

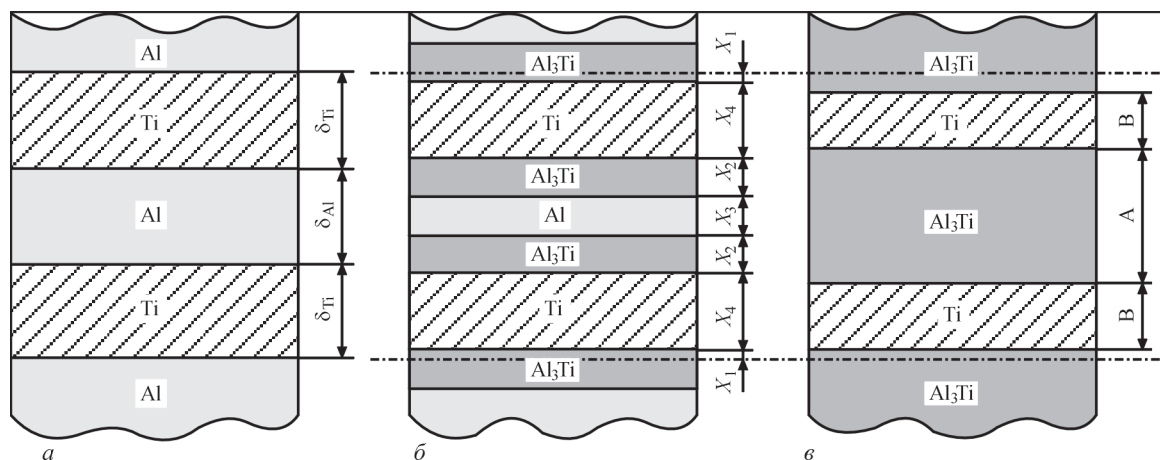


Рис. 3. Схема трансформації шарів пакету з фольги Al і Ti: а – початковий стан; б – проміжний стан; в – закінчення процесу [10]

рахунку параметрів обробки струмом багатошарового пакету для отримання метал-інтерметалідного ШКМ Ti– Al_3 Ti. Обґрунтовано вибір граничних значень сили струму, що дозволяють знизити час обробки пакету без підплавлення шарів алюмінію. Для розглянутого випадку гранична сила струму становить 150 А.

Одним з найбільш поширених способів виготовлення ШКМ є **прокатка**, яка являє собою спільне прокатування пакету з шарів металів.

Автори роботи [11] для отримання шаруватого титан-алюмінієвого композиту використовували метод прокатки. Для цього збирали в пакет пластини зі сплаву ВТ1-0 (100×50×0,1 мм) та сплаву АД1 (100×50×0,02 мм). Співвідношення товщини шарів титану і алюмінію вибирали наступні: 100/20, 100/40, 100/60, 100/200 (мкм). Прокатку проводили в сталевих обкладинках при температурі 450...520 °С в умовах вакууму 0,01 Па. При першому проході ступінь деформації становив 25...40 %, при наступних 8...10 %. У результаті було отримано смуги товщиною 0,35 мм з 4800 шарами. При цьому середня товщина титанового шару склала 100...120 нм, а алюмінієвого 80...90 нм. Деформація шарів з алюмінію становила на 25...30 % більше, ніж шарів з титану. Це призвело до порушення суцільності титанового шару. Деформація приповерхневих шарів обох матеріалів була на 10...15 % більшою за центральні. Результати експериментів дозволили встановити оптимальну температуру прокатки (470 °С) і ступінь обтиснення (до 30 % за проход), які дозволяють забезпечити зварювання шарів Ti і Al, а також запобігають утворенню більш ніж 0,5 % інтерметалідних фаз в композиті.

В роботі [12] пакет з двох фольг алюмінію АА1235 товщиною 300 мкм і однієї фольги титану товщиною 25 мкм прокатували при кімнатній температурі. Загальна товщина пакету зменшувалась з 625 до 130 мкм. При цьому шар титану руйнувався та диспергувався в алюмінієвій матри-

ці. Далі з метою формування інтерметаліду Al_3Ti виконували відпал отриманих зразків при 600 °С протягом 3600...10080 хв. При тривалості термообробки менше за 720 хв через значну різницю в дифузії Al і Ti при утворенні інтерметалідної фази на границі розділу Al/ Al_3Ti , спостерігаються пори (ефект Кіркендала), наявність яких призводить до зниження значень пластичності та міцності композиційного листа. Збільшення часу відпалу до 1440 хв сприяє заліковуванню пор, композиційний матеріал складається з крупнозернистих частинок Al та ультрадисперсних Ti та Al_3Ti , також при цьому досягаються вищі значення механічних властивостей ($\sigma_T = 135$ МПа). При тривалості відпалу 2880 хв відбувається зникнення чистого Ti з його повним переходом в Al_3Ti . При подальшому збільшенні часу відпалу до 10080 хв частинки Al_3Ti перерозподіляються в матриці Al ближче до поверхні ШКМ, що призводить до зниження міцності та пластичності.

Автори роботи [13] з'єднували фольги Al та Ti методом прокатки при кімнатній температурі. Після очищення металеву щітку та в ацетоні фольги збирали в пакет 100×50 мм, що складався з шарів титану товщиною 82 мкм і алюмінію товщиною 80...140 мкм. Було встановлено, що рівень деформації майже однаковий для всіх шарів ШКМ. Проте з'єднання центральних шарів пакету відбувається раніше за зовнішніх, причиною чого є еластичне відновлення зовнішніх шарів, що призводить до руйнування зв'язків, утворених після проходження під валками. Наявність подряпин на алюмінії після очищення призводить до збільшення коефіцієнту тертя на границях розділу шарів, що сприяє підвищенню міцності схоплювання на початковій стадії процесу та зменшенню витискання м'якого металу по краях пакету. Також експериментальні результати показали, що при використанні тоншого шару алюмінію (80 мкм) його товщина суттєво зменшується у порівнянні з початковим значенням. Збільшення товщини Al дозволяє отримати ШКМ з більш однорідною зміною

відносної товщини обох металів, а екструзія алюмінію мінімізується (рис. 4).

В роботі [14] досліджували утворення дислокацій в алюмінії при тривалому відпалі ШКМ Al/Ti/Al. Для виготовлення ШКМ використовували алюмінієву фольгу AA1235 товщиною 300 мкм та чистий титан товщиною 25 мкм. Холодну прокатку пакету з трьох фольг проводили на чотирьохвалковому прокатному стані з валками діаметром 50 мм. Загальна товщина пакету знизилась з 625 до 130 мкм. Після прокатки виконували відпал отриманих з'єднань при 600 °C протягом 360...10080 хв. Термічна обробка сприяє дифузії Al та Ti до границі розділу та реакції між ними з утворенням інтерметаліду Al_3Ti . Внаслідок ефекту Кіркендала та різниці молярних об'ємів реагентів відбувається утворення пор на границі розділу між Al та Al_3Ti . Збільшення тривалості відпалу до 2880 хв призводить до суттєвого зменшення розміру пор. При термообробці протягом 10080 хв є шарі Al поблизу інтерметаліду Al_3Ti спостерігається аномально висока щільність дислокацій $7,5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Автори стверджують, що причиною цього є розвиток пор і дифузія атомів Ti. Дифузія між Ti та Al і утворення Al_3Ti при тривалому відпалі сильно деформованого матеріалу дозволяє деяким атомам Ti виходити за межі стехіометрії Al_3Ti та утворювати буферну зону, що складається з твердого розчину Ti в Al. По мірі збільшення часу відпалу великі пори розпадаються на дрібніші та розподіляються в алюмінієвій матриці. Рух атомів при високій температурі сприяє поступовому зменшенню розміру сферичних пор, які в результаті стають вакансіями. Крім того, для мінімізації вільної енергії розподілені атоми Ti збиралися у вакансіях, а дислокації створювалися та закріплювалися атомами або кластерами Ti.

Ультразвукове зварювання відноситься до твердофазних методів і передбачає поряд з прикладенням тиску використання в якості джерела енергії ультразвукових коливань. Даний процес дозволяє з'єднувати широкий спектр металів товщиною до 3 мм. Зварювання відбувається при низьких температурах, що дозволяє отримувати з'єднання без утворення інтерметалідних сполук.

Автори роботи [15] виконували ультразвукове зварювання пакету Al/Ti в ШКМ. В якості пер-

шого шару використовували підкладку з алюмінієвого сплаву AA1100 товщиною 1,5 мм. Для експериментів було обрано фольгу з чистого титану та алюмінію AA1100 товщиною 127 мкм, які по чергово укладали у пакет з 2...10 шарів. За один прохід поєднували до чотирьох фольг. Після зварювання проводили термообробку при 480 °C протягом 240 хв. Було встановлено, що міцність на розрив росте зі збільшенням загальної кількості шарів і досягає $\sigma_b = 216 \text{ МПа}$ для ШКМ з 10 шарів, що пояснюється збільшенням об'ємного вмісту титану. Пластичність шаруватого матеріалу також зростає зі збільшенням кількості шарів до 6 ($\delta = 32 \%$), після чого майже не змінюється.

В роботі [16] були продовжені попередні дослідження, проте зварювання виконувалось вже без підкладки. В експериментах було використано чистий титан та алюміній марки 1100 товщиною по 127 мкм. Фольги по чергово складали в пакети з загальною кількістю шарів 7...15 штук, перший і останній з яких були з титану. Зразки з'єднували при деякому зусиллі та частоті сонотроду 20 кГц. В залежності від кількості шарів виконували декілька етапів зварювання. Спочатку збирали і пропускали під сонотродом пакет з трьох фольг Al/Ti/Al. Потім до нього додавали ще дві фольги Al + Ti та повторювали процес. Далі для покращення якості з'єднань проводили відпал при 480 °C протягом 240 хв. Збільшення кількості шарів має незначний вплив на механічні характеристики з'єднань. Проте кращі результати були отримані для пакету з 15 фольг, що пояснюється більшою кількістю проходів при зварюванні під сонотродом.

Автори роботи [17] досліджували особливості формування з'єднань ШКМ під впливом ультразвукового зварювання. Для цього було використано по три фольги з чистого титану та алюмінію 1100 з товщиною по 127 мкм. Зварювання було виконано на обладнанні Fabrisonic SonicLayer 4000 потужністю 9 кВт при наступних параметрах: зусилля стиснення 3500 Н, амплітуда вібрації 41,55 мкм, швидкістю зварювання 25,4 мм/с. Для підвищення пластичності та інтенсифікації процесу схоплення підкладку з алюмінієвого сплаву 6061 підігрівали до 93,3 °C. За проходів приварювали по одній фользі з титану та алюмінію. На границях розділу між окремими шарами спостерігаються несучільності. Інтерметаліди в зонах з'єднання відсутні. Під час зварювання деформується переважно алюміній, про що свідчить розорієнтація зерен на 9° і зменшення їх розміру більш ніж вдвічі при майже незмінних значеннях для титану. Було зроблено висновок, що основним механізмом, який відповідає за утворення з'єднання при ультразвуковому зварюванні є сильна деформація зсуву на границі розділу між шарами.

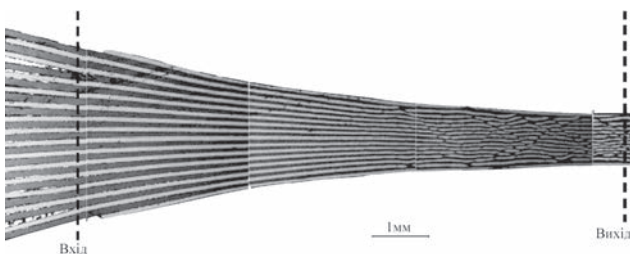


Рис. 4. Поперечний переріз ШКМ Al/Ti, отриманого методом прокатки [13]

Подальші дослідження були присвячені визначенню впливу термообробки на з'єднання та висвітлені в роботі [18]. Сплави і параметри режиму ультразвукового зварювання були ті ж самі, що і в попередній роботі. Зразки з'єднань піддавали відпалу при 600 °C протягом 60 хв. Були отримані бездефектні з'єднання, в яких після термообробки відбувається значний ріст зерна в алюмінієвому шарі та утворення тонкого прошарку інтерметаліду на границях розділу Al/Ti. Результати досліджень на відшаровування показали, що зусилля, необхідне для руйнування зразків після термічної обробки, більш ніж вдвічі вище ніж безпосередньо після зварювання (5,8 кН проти 2,4 кН). При цьому руйнування ШКМ після зварювання відбувається в межах одного шару, а у відпалених зразках – проходить через кілька шарів, що вказує на вищу міцність з'єднання вздовж шарів у порівнянні з вихідними матеріалами. Дослідження міцності на зсув показали таку ж тенденцію значень – $\tau_{\text{зр}} = 46,3$ МПа після зварювання та $\tau_{\text{зр}} = 102,4$ МПа для термооброблених ШКМ.

В роботі [19] досліджували вплив термічної обробки на механічні властивості ШКМ, отриманих методом ультразвукового зварювання. Була використана фольга з алюмінієвого сплаву 3003-Н18 товщиною 150 мкм і чистого титану товщиною 75 мкм. ШКМ нарощували пошарово на масивну підкладку зі сплаву 3003-Н18 починаючи з титану. Режим приварювання алюмінієвої фольги був наступний: зусилля стиснення 1750 Н, амплітуда вібрації 16 мкм, швидкість зварювання 23,7 мм/с; для фольги з титану – зусилля стиснення 2000 Н, амплітуда вібрації 28 мкм, швидкість зварювання 10,58 мм/с. Температура попереднього підігріву в обох випадках становила 150 °C. Далі проводили відпал при 480 °C протягом 30...270 хв. Методом оптичної металографії було показано суцільний контакт між Al та Ti, дефекти в зонах з'єднання не виявлені. Термообробка протягом 30 хв дозволяє зняти напруження, що

виникли між шарами металів в процесі зварювання, а також майже вдвічі підвищити міцність на зріз у порівнянні з невідпаленими зразками ($\tau_{\text{зр}} = 72,96$ МПа проти $\tau_{\text{зр}} = 37,78$ МПа). Збільшення тривалості витримки при відпалі призводить до перекристалізації та росту зерна, результатом чого є падіння міцності.

Застосування **дифузійного зварювання** дозволяє на початковому етапі процесу локалізувати пластичну деформацію матеріалу матриці, необхідну для заповнення простору між шарами зміцнюючої фази та для максимального ущільнення самої матриці. При виникненні щільного контакту між шарами на границі розділу протікають дифузійні процеси, які забезпечують міцний зв'язок на цих границях і необхідний рівень міцності самого КМ.

Автори роботи [20] фольги зі сплавів титану ТА1 та алюмінію 1060 розмірами 220×220×0,1 мм з'єднували методом дифузійного зварювання. Спочатку, для забезпечення щільного контакту між шарами Al і Ti, до зразків в вакуумній печі прикладали тиск 1 МПа. Далі протягом 180 хв виконували нагрівання до 500 °C з витримкою при цій температурі протягом 60 хв для забезпечення рівномірного прогрівання фольги. Потім ще на 30 хв підвищували температуру до 550 °C і витримували протягом 180 хв для проходження дифузійного зварювання між шарами, при цьому тиск збільшували до 3 МПа. Нарешті, фольгу охолоджували з піччю під тиском 1 МПа. Таким чином було отримано ШКМ без пор та інтерметалідних включень на границях між Al і Ti (рис. 5).

В роботі [21] вказується на необхідність попередньої дегазації фольги при виготовленні ШКМ. Автори використовували фольгу з алюмінію марки АМ5 та титану ВТ1-0 з товщинами, відповідно, 50 і 100 мкм. Фольгу промивали в ацетоні, збирали по чергові в пакет і нагрівали до 640 °C протягом 30 хв у вакуумі 1,333 Па для забезпечення проходження дегазації. Про досить інтенсивне газозвільнення свідчить падіння вакууму на цій ста-

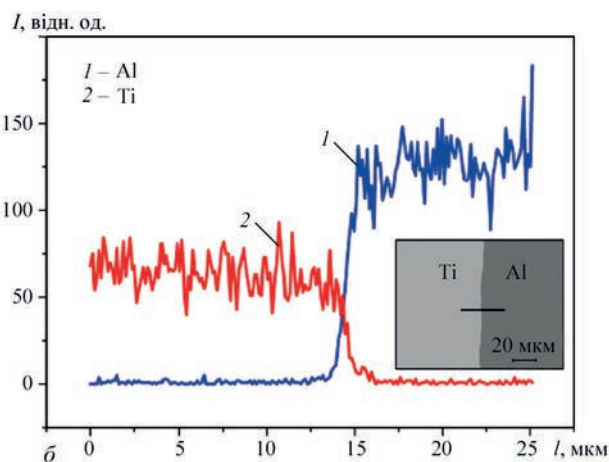
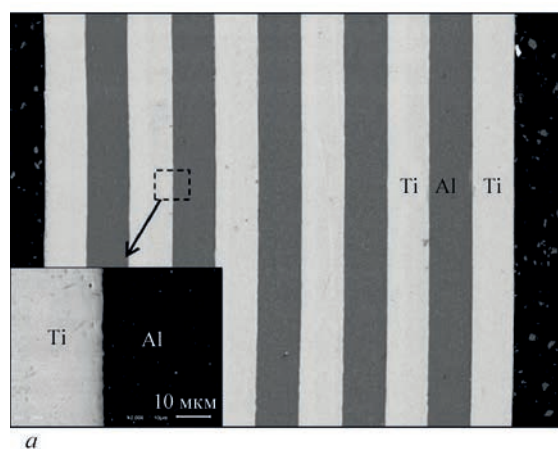


Рис. 5. Поперечний переріз (а) і розподіл елементів в зоні з'єднання (б) ШКМ Al/Ti, отриманого методом дифузійного зварювання [20]

дії на порядок до 13,33 Па. Далі зразки стискали з деяким зусиллям і витримували при тій же температурі ще 240 хв. В результаті був отриманий ШКМ $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$, причому в інтерметалідному шарі спостерігається велика кількість мікротріщин і пор на місці колишньої алюмінієвої фольги.

В роботі [22] методом дифузійного зварювання отримували ШКМ зі сплавів алюмінію 1060 товщиною 100 мкм і титану TA1 товщиною 150 мкм. Зварювання проводили на наступному режимі: температура 550 °С, тиск 5 МПа, тривалість процесу 180 хв, вакуум 10^{-3} Па. Для забезпечення щільного контакту між фольгами тиск прикладали перед нагріванням. Охолодження до кімнатної температури виконували разом із піччю. Було отримано ШКМ без пор, несущільностей та інтерметалідних включень з межею міцності $\sigma_b = 224$ МПа та відносним подовженням $\delta = 35$ %. Результати випробувань на вигин показали, що мікротріщини на границі розділу Al/Ti з'являються при куті згину 120°, при цьому руйнування зразка не відбувається навіть за його вигинання до 180°.

Автори роботи [23] досліджували вплив товщини фольги з алюмінію та титану на формування ШКМ методом дифузійного зварювання. В якості матеріалів для досліджень використовували чисті титан (товщиною 0,15...0,4 мм) і алюміній AA1060 (товщиною 0,1...0,4 мм). Фольгу Al і Ti розрізали на квадрати 300×300 мм. Вихідне співвідношення товщин шарів Al та Ti було наступне: 0,1/0,15, 0,2/0,25, 0,4/0,4. Загальна товщина пакету становила 1,15...1,2 мм. Перед зварюванням Ti попередньо протравлювали в розчині, що складався з 35 % азотної кислоти, 5 % фтористої кислоти та води. Алюмінієву фольгу спочатку очищали в підігрітому до 50...60 °С лужному розчині 30 г/л гідроксиду натрію, після чого занурювали в водний розчин азотної кислоти 300...350 г/л при кімнатній температурі. Далі зразки промивали у воді, потім у етанолі. Дифузійне зварювання проводили на наступному режимі: температура 550 °С, тиск 5 МПа, витримка протягом 180 хв в умовах вакууму 10^{-2} Па. Охолоджували в печі до кімнатної температури. Металографічні дослідження показали, що при зменшенні товщини шарів границя розділу між ними стає хвилеподібною, внаслідок чого збільшується загальна площа поверхні контакту між металами у порівнянні з вихідним станом. Зменшення співвідношення товщин шарів з 0,4/0,4 до 0,1/0,15 також сприяє збільшенню дифузійної зони з 4,1 до 5,2 мкм. Максимальну міцність на розтяг мали зразки зі співвідношенням товщин 0,4/0,4 ($\sigma_b = 288,03$ МПа), проте лише в зразках 0,1/0,15 ($\sigma_b = 223,67$ МПа) відсутнє відшарування між титаном і алюмінієм.

В роботі [24] були продовжені попередні дослідження з наголосом на вивченні процесу ініціювання та розповсюдження тріщини втоми в ШКМ. Були використані фольги Al і Ti з товщиною 0,15 та 0,1 мм, відповідно. Дифузійне зварювання здійснювали на режимі: температура 500...600 °С, тиск 5 МПа, тривалість витримки 180 хв, вакуум 10^{-3} Па. Бездефектні з'єднання без інтерметалідних включень та з вищими механічними властивостями були отримані при температурі зварювання 550 °С ($\sigma_b = 224$ МПа). Після 67554 циклів навантаження на краях зразків з'являються тріщини втоми. Механізмом їх ініціювання є суттєва локальна пластична деформація внаслідок високої концентрації напружень. Тріщини втоми поширюються в основному перпендикулярно до напрямку навантаження, при цьому в процесі поширення утворюються великі трикутні тріщини, та тріщини втоми розходяться у декількох напрямках, утворюючи велику кількість мікротріщин. Далі відбуваються міжфазні відшарування, вони перешкоджають подальшому ініціюванню та розповсюдженню тріщин втоми та вивільнюють напруження циклу втоми. Порогове значення розповсюдження тріщини втоми ШКМ Al/Ti становило близько $7,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, що вище ніж у титана та алюмінія.

В роботі [25] досліджували процес зародження та зростання інтерметалідної фази Al_3Ti між шарами Al і Ti при дифузійному зварюванні з подальшим відпадом. Для цього використовували листи алюмінію та титану з товщиною по 0,5 мм. Перед зварюванням зразки очищали в ультразвуковій ванні в 10 %-му розчині плавикової кислоти. Листи алюмінію та титану укладали по чергово до загальної товщини 5 мм, стискали з зусиллям 4 МПа, нагрівали до 550...575 °С та витримували протягом 120...360 хв. Відпал проводили при температурі зварювання протягом 720...2880 хв. Після зварювання тривалістю 360 хв в зоні з'єднання формується тонкий прошарок Al_3Ti , товщина якого збільшується у процесі подальшого відпалу. Після термообробки при 575 °С протягом 2880 хв шар алюмінію повністю зникає. Було встановлено, що при відпалі при 575 °С протягом 2160 хв швидкість дифузії Al в 20 разів вища за Ti ($D_{\text{Al}} = 27,133 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$ проти $D_{\text{Ti}} = 1,202 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$), це призводить до утворення пор поблизу границі розділу $\text{Al}/\text{Al}_3\text{Ti}$ внаслідок ефекту Кіркендала. Така домінуюча дифузія Al в бік Ti стимулює зародження та зростання інтерметалідної фази в основному на границі розділу $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$. На рис. 6 наведена схема росту Al_3Ti під впливом температури. Під час зварювання відбувається дифузія окремих атомів Al і Ti з утворенням фази Al_3Ti вздовж границі розділу Al/Ti (рис. 6, б). Під час відпалу відбувається неоднорідне

рідне зростання інтерметалідної фази (рис. 6, в): біля Ti формуються ультрадрібнодисперсні зерна Al_3Ti (A), в центральній частині шару Al_3Ti – зерна грубої структури (B), біля шару алюмінію – відносно невеликі зерна Al_3Ti (C). Причиною цього є високий рівень дифузії алюмінію, що сприяє більш інтенсивному формуванню зародків інтерметалідної фази на границі Ti/ Al_3Ti зі зміщенням областей A, B і C в бік алюмінієвого шару. Після повного переходу Al в інтерметалід області B і C змішуються в центральній частині інтерметалідного шару (рис. 6, з). Таким чином, кінцева структура зерна Al_3Ti складатиметься зі щойно вирощених дрібних зерен Al_3Ti на границі Ti/ Al_3Ti (D), область A з деяким збільшенням зерен зміщена в бік Al, що примикає до області D та змішаних областей B і C у центральній частині.

Автори роботи [26] досліджували реакційну дифузію в багатошаровому пакеті Al/Ti. Експерименти проводили з пакетом з 17 фольг титану та алюмінію розміром 90×25 мм. Фольги з Al та Ti попередньо протравлювали в 10 %-му розчині плавикової кислоти та 15 %-му розчині їдкого натру з подальшим очищенням спиртом і промиванням у воді. З'єднання проводили при температурі 600 °C, тиску 50 МПа, протягом 180 хв в умовах вакууму не нижче 10^{-2} Па. Далі отримані зразки відпалювали при 520...650 °C протягом 60...9000 хв. Було встановлено, що при термообробці в обраному інтервалі температур Al_3Ti є єдиною фазою, що спостерігається в дифузійній зоні. Титан та алюміній дифундують в напрямку один до одного, проте шари Al_3Ti ростуть головним чином у бік Al. При температурі 575...600 °C кінетика зростання Al_3Ti змінюється від параболічної до лінійної. В низькотемпературній кінетиці переважає дифузія атомів Ti вздовж границь зерен шарів Al_3Ti , тоді як реакція на границі розділу Al/ Al_3Ti у високотемпературному режимі обмежена дифузією атомів Ti у фольгу Al на фронті росту

Al_3Ti в результаті підвищеної розчинності Ti в Al з підвищенням температури.

В роботі [27] досліджували вплив товщини титану на формування ШКМ Al/Ti. Були використані титан товщиною 45...180 мкм і алюміній товщиною 54 мкм. Фольгу 40×80 мм зачищали металевою щіткою та очищали в спирті в ультразвуковій ванні. Далі у графітову матрицю почергово укладали 50 шарів Ti та 49 – Al. Зварювання проводили у вакуумній печі на режимі: температура 500 °C, тиск 50 МПа, витримка протягом 30 хв. Потім отриманий зразок для повного переходу алюмінію в інтерметалідні фази відпалювали без тиску при 900 °C протягом 30 хв. Остаточне спікання проводили в високому вакуумі порядку 10^{-3} Па при 1050 °C, під тиском 50 МПа протягом 60 хв, швидкість нагрівання становила 10 °C/хв, а охолодження – близько 15 °C/хв. Після всіх стадій термомодеформаційного впливу були отримані з'єднання з незначною пористістю. Незалежно від товщини титану сформувалась наступна послідовність шарів фаз: α -Ti, $AlTi_3$, $AlTi$, Al_2Ti та Al_3Ti . Найвищу міцність на розтяг ($\sigma_b = 606$ МПа) і в'язкість руйнування ($K_{IC} = 47,6$ МПа·м^{1/2}) мали зразки, отримані з титаном товщиною 90 мкм. Це пояснюється оптимальним співвідношенням (майже один до одного) між α -Ti та загальною товщиною інтерметалідних шарів. Така об'ємна частка шарів α -Ti ефективно запобігає безперервному поширенню тріщини в режимі відкриття, змушуючи її відхилятися та роздвоюватися в інтерметалідних шарах. Пластичне деформування титану може поглинути велику кількість енергії до руйнування матеріалу.

Зварювання вибухом має обмежене використання для виготовлення ШКМ. Воно являє собою твердофазний процес отримання з'єднань з інтенсивною пластичною деформацією металу під впливом імпульсу високої амплітуди і малої тривалості.

В роботі [28] для виготовлення ШКМ Al/Ti було застосовано зварювання вибухом. В якості матеріалів для досліджень використовували спла-

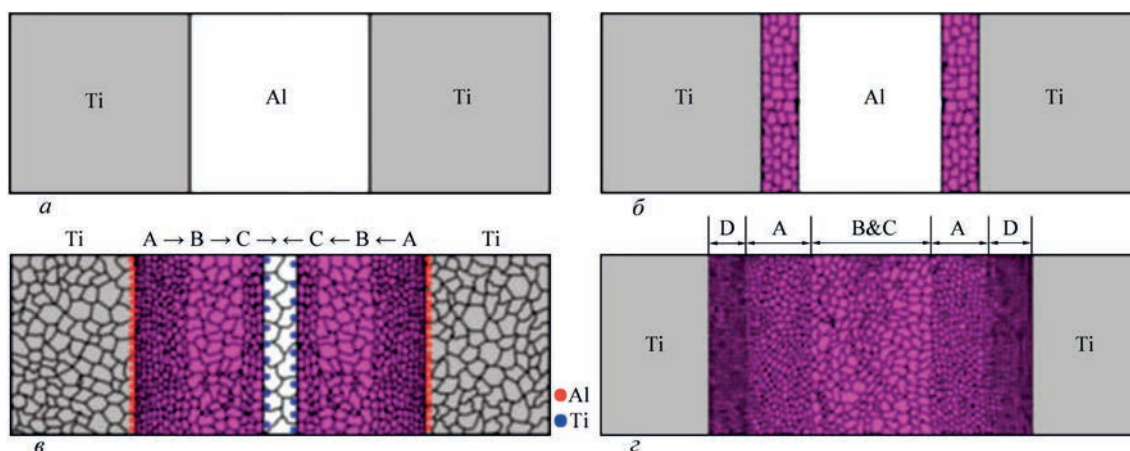


Рис. 6. Схематичне зображення процесу росту Al_3Ti у шаруватій системі Al/Ti: а – вихідний стан; б – проміжні стадії; в – кінцева структура після переходу Al в інтерметалід [25] (опис A, B, C, D – див. у тексті)

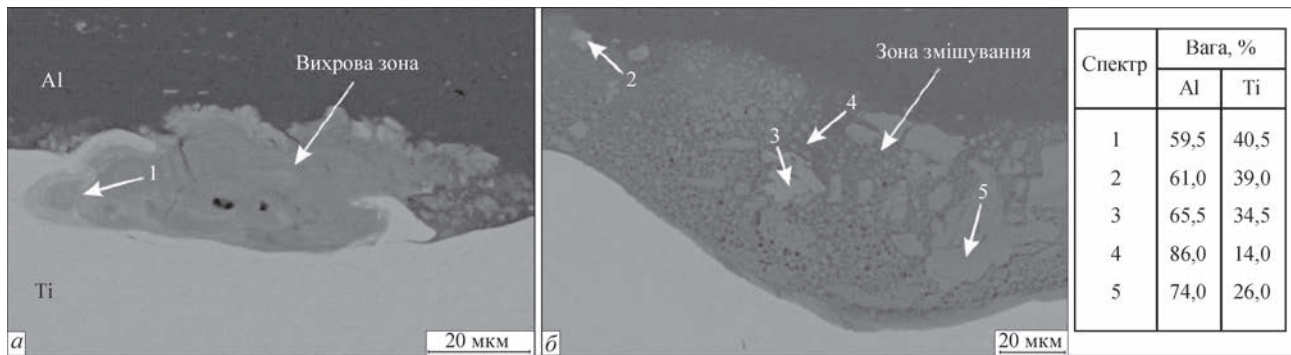


Рис. 7. Структура та хімічний склад зон змішування, що утворюються після зварювання вибухом ШКМ Al/Ti: а – вихрові; б – дисперсні включення (позначені стрілками) [28]

ви титану ВТ1 і алюмінію (Al–1Mn) розмірами $100 \times 200 \times 0,2$ мм та $100 \times 200 \times 0,25$ мм, відповідно. Листи почергово вкладали в пакет із загальною кількістю 40 штук. В якості вибухівки було використано порошок аммоніту 6GV щільністю $0,9 \text{ г/см}^3$ та швидкістю детонації 4200 м/с . Далі проводили термообробку в атмосфері повітря при температурі 640°C , тиском 3 МПа, протягом 1200 хв. В отриманих зразках спостерігається зміна зони з'єднання між шарами алюмінію та титану від хвиляподібної до майже прямолінійної по мірі віддалення від епіцентру вибуху. Неоднорідність впливу вибухової хвилі є причиною наявності макропор між окремими шарами. В зонах змішування утворюються наступні інтерметалідні фази: Al_3Ti , AlTi , Al_2Ti_3 і AlTi_3 (рис. 7). Подальша термічна обробка ШКМ призвела до росту Al_3Ti , швидкість росту якого в чотири рази була вищою у порівнянні зі зразками, виготовленими за технологією спікання. Прикладення тиску при відпалі дозволяє отримати зразки з мінімальною кількістю дефектів.

Автори робіт [29, 30] зварюванням вибухом поєднували пакет з шести листів алюмінію та титану товщиною 0,5 мм. В якості вибухової речовини використовували суміш аміачної селітри з тротилом і газойлем товщиною 20 мм. Швидкість детонації становила близько 4500 м/с . Далі зразки ШКМ відпалювали при 630°C протягом 60...15600 хв в атмосфері навколишнього середовища. Після зварювання зона з'єднання між алюмінієм і титаном являє собою пряму лінію без вихорів. В деяких місцях між Al і Ti спостерігаються ділянки з Al_3Ti , утворення якого пов'язано з локальним підвищенням температури в процесі зварювання. Під час відпалу протягом перших 780 хв швидкість росту шару інтерметаліду має лінійний характер, після чого її поведінка змінюється на параболічну. Це свідчить про перехід механізму росту Al_3Ti від контрольованої реакції до контрольованої дифузії.

В роботі [31] отримували біметал Al/Ti з до- сить товстих листів методом зварювання вибухом. Для цього були використані пластини з титану Ti Gr.2 ($140 \times 460 \times 0,8$ мм) і алюмінію A1050

($140 \times 460 \times 4$ мм). Відстань між металами до вибуху становила 1,5 мм, а швидкість детонації 1900...1950 м/с. Далі зразки відпалювали в герметичних кварцових ампулах при 552°C протягом 30...6000 хв. Після зварювання було отримано бездефектні з'єднання. Зона з'єднання між алюмінієм і титаном набуває хвиляподібного вигляду, в вихорах якої утворюються інтерметаліди Al_3Ti , Al_2Ti , AlTi і AlTi_3 . Процес відпалу робить фазу Al_3Ti домінуючою, сприяючи зростанню її шару по всій поверхні з'єднання. Дослідження кінетики інтерметаліду Al_3Ti показали чотири етапи його росту: інкубаційний період (до 90 хв); ріст, що регулюється хімічною реакцією (90...300 хв), змішаний механізм хімічної реакції та об'ємної дифузії (300...2160 хв); об'ємна дифузія (2160...6000 хв). Під час термообробки відбувається інтенсивне зростання зерен алюмінію.

Висновки

На основі представленого огляду публікацій можна констатувати, що:

1. Використання ШКМ може значно поліпшити властивості конструкцій з них, а саме в'язкість руйнування, втомні та ударні характеристики, знос, корозію та демпфуючу здатність.

2. Процес з'єднання алюмінію з титаном можливо проводити як в умовах вакууму, так і на повітрі, при цьому в залежності від кінцевого продукту можливе отримання ШКМ як зі зміцненням за рахунок утворення інтерметалідних прошарків, так і без.

3. Основними методами виготовлення ШКМ на основі алюмінію та титану є просочення (через розплав), прокатка, спікання, зварювання ультразвуком, вибухом та дифузійне зварювання.

4. Кожен процес зварювання має свої характерні особливості. Метод просочення (через розплав) передбачає контакт рідкого алюмінію з твердим титаном та не дозволяє отримати ШКМ без інтерметалідного прошарку. Процес прокатки для отримання ламінатів потребує значної пластичної деформації пакету, що обумовлює значну кількість циклів прокатки. Зварювання ультразвуком

використовується тільки для отримання шаруватого пакету з тонкої фольги. Зварювання вибухом супроводжується утворенням хвилюподібної зони з'єднання та потребує для вирівнювання хімічного складу подальшої термічної обробки. Дифузійне зварювання в залежності від параметрів режиму зварювання дозволяє отримувати ШКМ як з утворенням інтерметалідної фази в стику, так і без неї.

Виходячи з можливостей широкого регулювання структури та складу ШКМ на етапі утворення з'єднання, отриманого за допомогою дифузійного зварювання, актуальними є подальші дослідження з виготовлення таких матеріалів із регульованим вмістом інтерметалідної фази в стику.

Список літератури/References

- Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. (2008) *Материаловедение. Учебник для вузов*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.
- Arzamasov, B.N., Makarova, V.I., Mukhin, G.G. et al. (2008) *Materials science: Manual for Higher Education Instit.* Moscow, N.E. Bauman MGTU [in Russian].
- Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. (2011) *Новые композиционные материалы*. Учебное пособие. Тамбов, ГОУ ВПО ТГТУ.
- Tyalina, L.N., Minaev, A.M., Pruchkin, V.A. (2011) *New composite materials: Manual*. Tambov, GOU VPO TGTU [in Russian].
- Ковтунов А.И., Мямин С.В., Семистенова Т.В. (2017) *Слоистые композиционные материалы*. Электронное учебное пособие. Тольятти, ТГУ.
- Kovtunov, A.I., Myamin, S.V., Semistenova, V.V. (2017) *Layered composite materials: Electron manual*. Tolyatti, TGU [in Russian].
- Wadsworth J., Lesuer D.R. (2000) Ancient and modern laminated composites – from the Great Pyramid of Gizeh to Y2K. *Materials Characterization*, **4–5**, 289–313.
- Гуревич Л.М. (2013) Механизмы структурообразования при взаимодействии титана с расплавом алюминия. *Известия ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»*, **6**, 6–13.
- Gurevich, L.M. (2013) Mechanisms of structure formation at interaction of titanium with aluminium melt. *Izvestiya VolgGTU, Seriya Problemy Materialovedeniya, Svarki i Prochnosti v Mashinostroenii*, **6**, 6–13 [in Russian].
- Ковтунов А.И., Мямин С.В. (2013) Исследование технологических и механических свойств слоистых титаноалюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом. *Авиационные материалы и технологии*, **1**, 9–12.
- Kovtunov, A.I., Myamin, S.V. (2013) Investigation of technological and mechanical properties of layred titanium-aluminium composite materials produced by liquid-phase method. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **1**, 9–12 [in Russian].
- Кузьмин К.А., Лазуренко Д.В., Матц О.Э. (2014) Формирование композиционных материалов типа «титан-алюминид титана» методом искрового плазменного спекания. *Актуальные проблемы в машиностроении. Материалы I междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 26 марта 2014 г.* Новосибирск, НГТУ, сс. 514–520.
- Kuzmin, K.A., Lazurenko, D.V., Mats, O.E. (2014) Formation of “titanium-titanium aluminide” composite materials by the method of spark plasma sintering. In: *Proc. of 1st Int. Sci.-Pract. Conf. on Actual Problems in Machine-Building (Novosibirsk, 26 March 2014)*. Novosibirsk, NGTU, 514–520.
- Yanbo Sun, Sanjay Kumar Vajpai, Kei Ameyama, Chaoli Ma (2014) Fabrication of multilayered Ti–Al intermetallics by spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, **5**, 734–740.
- Синчук А.В., Цуркин В.Н., Иванов А.В. и др. (2014) Влияние электрического тока на реакционное спекание слоистой системы Al–Ti. *Конструкции из композиционных материалов*, **1**, 24–31.
- Sinchuk, A.V., Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V. (2016) Effect of electric current on reaction sintering of Ti–Al layered system. *Konstruktsii iz Kompozitsionnykh Materialov*, **1**, 24–31 [in Russian].
- Васянович Н.А., Цуркин В.Н. (2016) Базовые принципы ферроэлектрического синтеза металл-интерметаллидно-го ламината Ti–Al₃Ti из пакета фольги Al–Ti. *Электронная обработка материалов*, **52**, 33–39.
- Vasyanovich, N.A., Tsurkin, V.N. (2016) Basic principles of ferroelectric synthesis of metal-intermetallic laminate Ti–Al₃Ti from foil package Al–Ti. *Electron. Obrabotka Materialov*, **52**, 33–39 [in Russian].
- Куркин С.Э. (2016) Технология получения слоистого алюминий-титанового композита, упрочненного интерметаллидами. *Новая наука: теоретический и практический взгляд*, **5**, 192–196.
- Kurkin, S.E. (2016) Technology of production of layered aluminium-titanium composite material strengthened with intermetallics. *Novaya Nauka: Teoreticheskiy i Prakticheskiy Vzglyad*, **5**, 192–196 [in Russian].
- Hailiang Yu, Cheng Lu, A. Kiet Tieu et al. (2016) Annealing effect on microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminate sheets. *Materials Science & Engineering A*, **13**, 195–204.
- Gajanan P. Chaudhari, Viola Acoff (2009) Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites. *Composites Science and Technology*, **10**, 1667–1675.
- Hailiang Yu, A. Kiet Tieu, Cheng Lu, Charlie Kong (2014) Abnormally high residual dislocation density in pure aluminium after Al/Ti/Al laminate annealing for seven days. *Philosophical Magazine Letters*, **11**, 732–740.
- Kaya I., Cora O.N., Acar D., Koc M. (2018) On the Formability of Ultrasonic Additive Manufactured Al–Ti Laminated Composites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **49**, 5051–5064.
- Kaya I., Cora O.N., Koc M. (2019) Formability of Ultrasonically Additive Manufactured Ti–Al Thin Foil Laminates. *Materials*, **12**, 1–16.
- Sridharan N., Wolcott P., Dapino M., Babua S.S. (2016) Microstructure and texture evolution in aluminum and commercially pure titanium dissimilar welds fabricated using ultrasonic additive manufacturing. *Scripta Materialia*, **17**, 1–5.
- Wolcott P.J., Sridharan N., Babu S.S. et al. (2016) Characterisation of Al–Ti dissimilar material joints fabricated using ultrasonic additive manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, **2**, 114–123.
- Obielodan J.O., Stucker B.E., Martinez E. et al. (2011) Optimization of the shear strengths of ultrasonically consolidated Ti/Al 3003 dual-material structures. *Journal of Materials Processing Technology*, **211**, 988–995.
- Liang Qin, Hui Wang, Shengqiang Cui et al. (2017) Characterization and Formability of Titanium/Aluminum Laminate Composites Fabricated by Hot Pressing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **7**, 3579–3587.
- Краснов Е.И., Штейнберг А.С., Шавнев А.А., Березовский В.В. (2013) Исследование слоистого металлического композиционного материала системы Ti–TiAl₃. *Авиационный материалы и технологии*, **3**, 16–19.
- Krasnov, E.I., Shteinberg, A.S., Shavnev, A.A., Berezovsky, V.V. (2013) Examination of layered metallic composite materials of Ti–TiAl₃ system. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **3**, 16–19 [in Russian].
- Liang Qina, Minyu Fan, Xunzhong Guo, Jie Tao (2018) Plastic deformation behaviors of Ti–Al laminated composite fabricated by vacuum hot-pressing. *Vacuum*, **155**, 96–107.
- Minyu Fan, Joseph Domblesky, Kai Jin et al. (2016) Effect of original layer thicknesses on the interface bonding and mechanical properties of TiAl laminate composites. *Materials & Design*, **5**, 535–542.

24. Fan M., Luo Z., Fu Z. et al. (2018) Vacuum hot pressing and fatigue behaviors of Ti/Al laminate composites. *Vacuum*, **154**, 101–109.
25. Thiyaneshwaran N., Sivaprasad K., Ravisankar B. (2018) Nucleation and growth of TiAl₃ intermetallic phase in diffusion bonded Ti/Al Metal Intermetallic Laminate. *Scientific Reports*, **8**, 1–8.
26. Xu L., Cui Y.Y., Hao Y.L., Yang R. (2006) Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples. *Materials Science and Engineering: A*, **435–436**, 638–647.
27. Shaoyuan Lyu, Yanbo Sun, Lei Ren et al. (2017) Simultaneously achieving high tensile strength and fracture toughness of Ti/Ti–Al multilayered composites. *Intermetallics*, **90**, 16–22.
28. Lazurenko D.V., Bataev I.A., Mali V.I. et al. (2016) Explosively welded multilayer Ti–Al composites: Structure and transformation during heat treatment. *Materials & Design*, **102**, 122–130.
29. Foadian F., Soltanieh M., Adeli M., Etminanbakhsh M. (2014) A study on the formation of intermetallics during the heat treatment of explosively welded Al–Ti multilayers. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, **45**, 1823–1832.
30. Foadian F., Soltanieh M., Adeli M., Etminanbakhsh M. (2014) The formation of TiAl₃ during heat treatment in explosively welded Ti–Al multilayers. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, **11**, 12–19.
31. Fronczek D.M., Wojewoda-Budka J., Chulist R. et al. (2016) Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing. *Materials and Design*, **91**, 80–89.

PECULIARITIES OF PRODUCING LAYERED METAL COMPOSITE MATERIALS ON ALUMINIUM BASE

Yu.V. Falchenko, L.V. Petrushinets, E.V. Polovetskii

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

Analysis of publications devoted to producing layered composite materials on aluminium base was performed. The methods of joining thin-foil materials were studied, which allow producing layered joints with different number of intermediate layers. It is shown that the main welding methods, allowing production of joints with a layered structure, are rolling, ultrasonic, explosion, and diffusion welding, and reaction sintering. Analysis of publications showed that the joining process can be conducted, both in vacuum and in air. Joining foil from titanium and aluminium in the welding modes below the aluminium melting temperature (660 °C) allows producing joints without intermetallic phase formation between the layers. In order to improve the strength of the produced composites, it is rational to apply during welding a technological operation in the form of current passing or post-weld heat treatment of layered composite materials that provides increase of reactivity between the aluminium and titanium layers and formation of intermetallic phase as the reaction product. 31 Ref., 7 Fig.

Keywords: metal layered composite materials, joining methods, joint zone, intermetallic phase

Надійшла до редакції 29.01.2020

ХІХ МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020 МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

24 - 27 листопада



ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: Ексклюзивний медіа партнер:



ЖУРНАЛ
ГОЛОВНОГО
ІНЖЕНЕРА

Технічний
партнер:

ReutMedia



Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua



ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ПРОКОВКИ ТА АТМОСФЕРИ МОРСЬКОГО КЛІМАТУ НА ЦИКЛІЧНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ ТАВРОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З ПОВЕРХНЕВИМИ ВТОМНИМИ ТРІЩИНАМИ

В.В. Книш, С.О. Соловей, Л.І. Ниркова, В.Г. Кот, А.О. Гришанов

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

Приведено результати досліджень ефективності застосування технології високочастотної механічної проковки для збільшення залишкової довговічності таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими втомними тріщинами довжиною 2...20 мм та корозійними пошкодженнями, характерними конструкціям після тривалої експлуатації в умовах морського клімату. Тривалий вплив атмосфери морського клімату, який характерний прибережним областям України, на стан поверхні з'єднань моделювали експонуванням зразків у камері соляного туману КСТ-1 протягом 1200 год. Показано, що поверхневі тріщини та корозійні пошкодження суттєво знижують залишкову циклічну довговічність зварних з'єднань. Експериментально встановлено, що зміцнення технологією ВМП таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною 5...7 мм (глибиною до 1,6 мм) та характерними корозійними пошкодженнями збільшує їх залишкову циклічну довговічність до рівня зварних з'єднань з корозійними пошкодженнями, зміцненими високочастотною механічною проковкою на стадії виготовлення. Показано, що при наявності в з'єднаннях втомних тріщин довжиною 20 мм (глибиною близько 6 мм) їх залишкова довговічність знижується до 10 разів, при цьому застосування технології високочастотної механічної проковки до таких з'єднань не призводить до підвищення циклічної довговічності та є неефективним. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: таврове зварне з'єднання, корозійне середовище, втома, прискорені корозійні випробовування, соляний туман, високочастотна механічна проковка, підвищення циклічної довговічності.

Технологія високочастотної механічної проковки (ВМП), відома також як ультразвукова ударна обробка, широко застосовується для підвищення характеристик опору втомі зварних з'єднань металоконструкції [1–6]. Дану технологію рекомендують застосовувати до зварних металоконструкцій, які експлуатуються в умовах впливу морського клімату (мости, шляхопроводи, морські платформи та ін.) [7–11]. Проте всі наведені у зазначених вище роботах експериментальні дані отримані на зразках зварних з'єднань у лабораторних умовах на повітрі (без впливу корозії), які зміцнювали технологією ВМП відразу після зварювання. Очевидно вважається, що від впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища (від корозії) дані конструкції захищають лакофарбовими покриттями. Проте в процесі тривалої експлуатації можуть відбуватися механічні пошкодження, розтріскування та відшарування лакофарбових покриттів. Це призводить до того, що зварні елементи конструкцій піддаються не тільки змінному навантаженню, а і корозійному впливу. У роботах [12, 13] досліджена ефективність застосування технології ВМП до зварних конструкцій з заданим рівнем накопичених втомних та корозійних пошкоджень. Експериментально встановлено,

що зміцнення технологією ВМП стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД після попереднього циклічного напруження ($2 \cdot 10^6$ циклів) та експонування за впливу нейтрального соляного туману протягом 1200 год (моделювали тривалий вплив атмосфери морського клімату) призводить до збільшення їх циклічної довговічності до 10 разів, а границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів підвищується на 25 % [12]. Застосування технології ВМП дозволяє також до 10 разів підвищити циклічну довговічність стикових зварних з'єднань з заданим рівнем накопичених втомних та корозійних пошкоджень, які характерні металоконструкціям після тривалого впливу атмосфери помірного клімату центральних областей України [13]. Проте на даний час відсутні дані щодо ефективності застосування технології ВМП до зварних з'єднань металоконструкцій, які внаслідок тривалої експлуатації в умовах впливу морського клімату, характерного прибережним областям України, містять поверхневі втомні тріщини незначної глибини та характерні корозійні пошкодження.

Мета даної роботи – дослідити залишкову циклічну довговічність таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми та корозійними пошкодженнями, характерними зварним метало-

Книш В.В. – <http://orcid.org/0000-0003-1289-4462>, Соловей С.О. – <http://orcid.org/0000-0002-1126-5536>, Гришанов А.О. – <http://orcid.org/0000-0003-1044-2374>, Ниркова Л.І. – <http://orcid.org/0000-0003-3917-9063>, Кот В.Г. – <http://orcid.org/0000-0002-4759-9992>

© В.В. Книш, С.О. Соловей, Л.І. Ниркова, В.Г. Кот, А.О. Гришанов, 2020

конструкціям після тривалої експлуатації в умовах морського клімату, без та після застосування технології ВМП.

Матеріал і методика досліджень. Експериментальні дослідження проводили на зразках таврових зварних з'єднань низьколегованої сталі 15ХСНД ($\sigma_t = 400 \text{ МПа}$, $\sigma_b = 565 \text{ МПа}$), яка широко застосовується для виготовлення елементів металоконструкцій тривалої експлуатації (наприклад, в прогонових будовах залізничних і автомобільних мостів), має підвищену міцність, добре зварюється, стійка в атмосферних умовах і роботоздатна в діапазоні температур від мінус 70°C до плюс 45°C .

Заготовки під зразки зварних з'єднань вирізали з гарячекатаного листового прокату товщиною 12 мм 12 категорії в напрямку прокату. Таврові зварні з'єднання отримували шляхом приварки ручним дуговим зварюванням електродами марки УОНИ 13/55 поперечних ребер жорсткості (також зі сталі 15ХСНД) до заготовок розмірами $350 \times 70 \text{ мм}$ з двох сторін кутовими швами. Корінь (перший шов) виконували електродами діаметром 3 мм, другий шов формували електродами діаметром 4 мм. Форма та геометричні розміри зразків таврових зварних з'єднань наведено на рис. 1. Товщина зразка обумовлена широким застосуванням в інженерних зварних металоконструкціях прокату товщиною 12 мм, а ширину робочої частини 50 мм вибирали виходячи з потужності випробувального устаткування.

Всі дослідження на втому проводили на випробувальній сервогидравлічній машині УРС-20 з асиметрією циклу $R_\sigma = 0$ та частотою 5 Гц при регулярному навантаженні. На першому етапі проводили втомні випробування при макси-

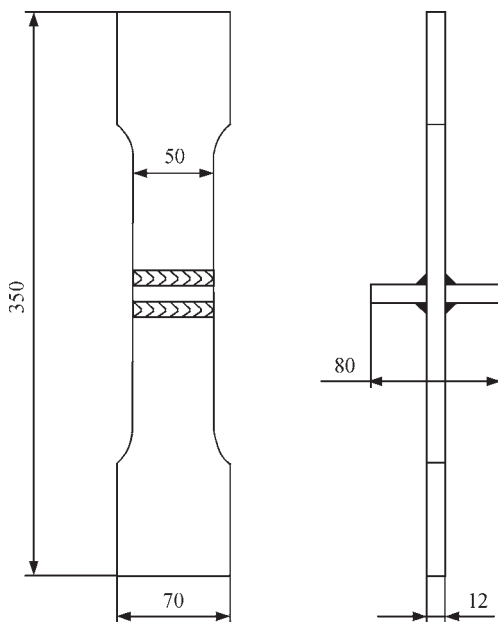


Рис. 1. Форма та геометричні розміри зразків таврового зварного з'єднання

мальних значеннях прикладених напружень циклу 180 МПа з метою ініціювання та розвитку на поверхні зразків втомних тріщин незначних розмірів. Даний рівень прикладених максимальних напружень близький до границі обмеженої витривалості даних з'єднань на базі $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень [14]. Для уникнення складнощів, пов'язаних з достовірним визначенням глибини втомної тріщини під час досліджень у якості критерію завершення втомних випробувань було вибрано досягнення тріщиною на поверхні зразка заданого розміру від 5 до 30 мм. Під час даних випробувань зразки в зоні зварного шва змащували індикаторною рідиною, що складалася з гасу та тонеру. Після утворення на поверхні зразка тріщини заданої довжини (всі тріщини утворювалися по лінії переходу металу шва на основний метал) залишки індикаторної рідини видаляли продуванням стиснутим повітрям. Індикаторну рідину при подальших випробуваннях зразків більш не застосовували, що дозволило визначити геометричні розміри початкових тріщин на зламах зварних з'єднань. Після розвитку тріщин на поверхні зразків до заданого розміру проводили прискорені корозійні випробування в умовах, які моделюють вплив атмосфери помірного клімату прибережних областей України. Оскільки для прибережних областей характерна присутність хлоридів у навколишньому середовищі, то їх тривалий вплив на зварні з'єднання моделювали експонуванням зразків в умовах нейтрального соляного туману протягом 1200 год. Тобто зразки зварних з'єднань експонували в камері соляного туману КСТ-1 при температурі $(35 \pm 2)^\circ \text{C}$ при розпилюванні розчину хлориду натрію 15 хв через кожні 45 хв досліджень. Концентрація хлориду натрію в розчині – $(50 \pm 5) \text{ г/дм}^3$; рН – від 6,5 до 7,2; щільність – $1,03 \text{ г/см}^3$. Електропровідність дистильованої води для приготування розчину хлориду натрію – не більше 20 мкСм/см при температурі $(25 \pm 2)^\circ \text{C}$. Таким чином, внаслідок попередніх втомних та прискорених корозійних випробувань дослідні зразки мали пошкодження, характерні пошкодженням зварних з'єднань металоконструкцій після довготривалої експлуатації при змінному навантаженні в умовах помірного клімату прибережних областей України.

При підготовці зразків з поверхневими втомними тріщинами та корозійними пошкодженнями для випробувань на втому їх захватні частини повторно зачищали від корозійних пошкоджень. Зачистку зони шва від продуктів корозії до металевго блиску не проводили. Одну частину зразків залишали у незміцненому стані, а другу – зміцнювали технологією ВМП. Зміцнення зварних з'єднань технологією ВМП виконували приладом

USTREAT-1.0, в якому ручний компактний ударний інструмент з п'єзокерамічним перетворювачем з'єднаний з ультразвуковим генератором вихідною потужністю 500 Вт. При обробці зварних з'єднань технологією ВМП поверхневому пластичному деформуванню піддавали не тільки лінію сплавлення, яка містила тріщину втоми, а всі чотири лінії переходу металу шва на основний метал таврового з'єднання. У якості пристрою для зміцнення використовували однорядну чотирьохбоеккову насадку з діаметром бойків 3 мм. Зміцнення проводили без попереднього очищення поверхні від продуктів корозії.

Таким чином, випробування на втому проводили на двох серіях зразків:

- зразки таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами довжиною 5...30 мм і корозійними пошкодженнями (перша серія);
- зразки таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами довжиною 5...30 мм і корозійними пошкодженнями, які зміцнювали технологією ВМП (друга серія).

Експериментальні дослідження залишкової довговічності даних зварних з'єднань проводили до повного руйнування зразків або перевищення бази випробувань $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень при регулярному навантаженні з асиметрією циклу $R_\sigma = 0$ і частотою 5 Гц.

Результати випробувань. Опис корозійних пошкоджень, які мали місце в таврових зварних з'єднаннях після корозійних випробувань у камері соляного туману КСТ-1 протягом 1200 год, приведено раніше у роботі [14].

Результати втомних випробувань таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з тріщинами втоми без зміцнення ВМП (перша серія) наведено на рис. 2 та в табл. 1. На рис. 2 також наведено дані опору втомі таврових зварних з'єднань у вихідному та зміцненому ВМП станах після корозійних

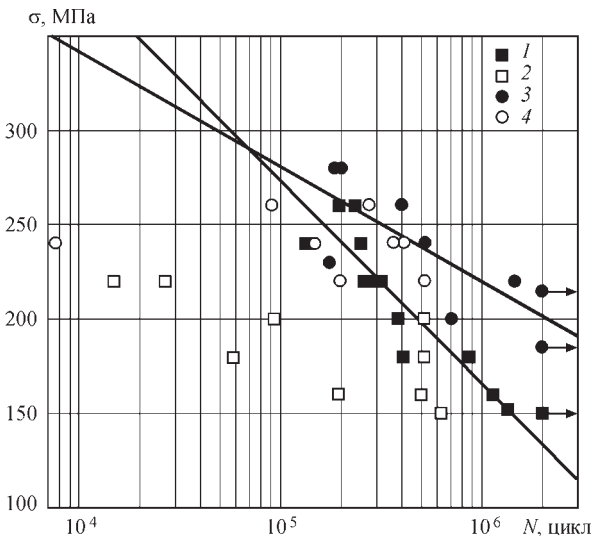


Рис. 2. Експериментальні дані втомних випробувань таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД: 1 – у вихідному стані після витримки у камері КСТ-1 протягом 1200 год [14]; 2 – після напрацювання до утворення поверхневих тріщин втоми та витримки у камері КСТ-1 протягом 1200 год; 3 – після зміцнення ВМП та витримки у камері КСТ-1 протягом 1200 год [14]; 4 – після напрацювання до утворення поверхневих тріщин втоми, витримки у камері КСТ-1 протягом 1200 год та послідовного зміцнення технологією ВМП (суцільні лінії – лінії регресії даних 1 та 3).

випробувань у камері соляного туману КСТ-1 протягом 1200 год, отримані у роботі [14]. В табл. 1 приведено розміри поверхневих тріщин, які були встановлені після випробувань на втому при дослідженні поверхонь зламу зразків завдяки застосуванню індикаторної рідини. Злами зразків таврових з'єднань з поверхневими тріщинами та корозійними пошкодженнями наведено на рис. 3. Як видно, запропонована методика дозволяє чітко визначити на зламах геометричні розміри початкової тріщини після руйнування зразків. Не дивлячись на те, що всі тріщини втоми зароджувалися по зоні сплавлення в центрі зразка, коефіцієнт стискання поверхневої тріщини (відношення

Таблиця 1. Циклічна довговічність таврових зварних з'єднань з корозійними пошкодженнями та поверхневими тріщинами втоми

Номер зразка	$l_{тр}$, мм	$h_{тр}$, мм	$N_{тр}$, цикли	σ_{max} , МПа	$N_{тр}^{незмц}$, цикли	Примітка
2290	8	3,3	1531200	160	192900	Руйнування по лінії сплавлення
2291	5	0,9	1345200	150	630600	—«—
2292	2	0,5	1950000	180	517700	—«—
2293	11	2,2	1136000	200	93400	—«—
2294	20	3,5	1353200	220	26700	—«—
2295	20	5,8	804800	220	14800	—«—
2296	5	1,0	1415300	200	516800	—«—
2297	15	5,8	1610900	180	58300	—«—
2298	9	2,1	1866400	160	500400	—«—

Примітка. $l_{тр}$ і $h_{тр}$ – довжина і глибина тріщини до корозійних випробувань, відповідно; $N_{тр}$ – циклічна довговічність до зародження тріщини заданої довжини при максимальних прикладених напруженнях 180 МПа; σ_{max} – максимальні напруження циклу, які прикладалися до зразка з тріщиною після корозійних випробувань у камері КСТ-1 протягом 1200 год; $N_{тр}^{незмц}$ – залишкова циклічна довговічність зразка з тріщиною втоми заданої довжини та корозійними пошкодженнями.

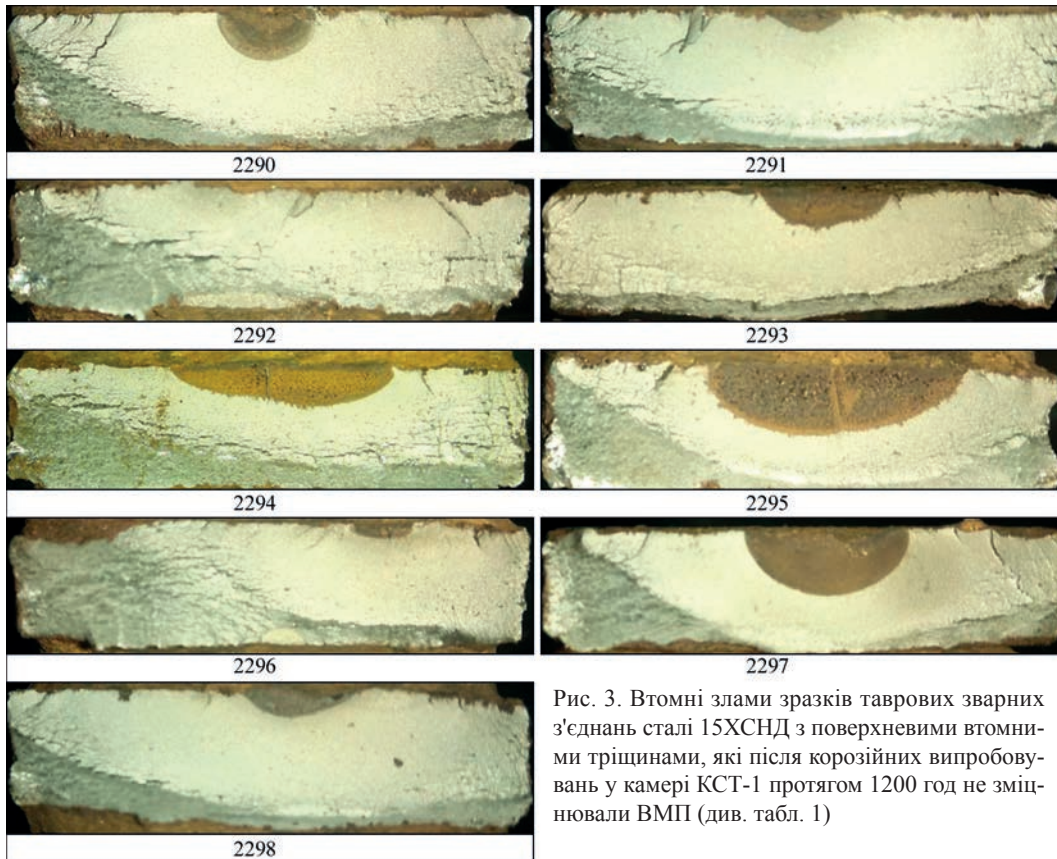


Рис. 3. Втомні злами зразків таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими втомними тріщинами, які після корозійних випробувань у камері КСТ-1 протягом 1200 год не зміцнювали ВМП (див. табл. 1)

глибини тріщини до напівдовжини) в них знаходиться в діапазоні від 0,350 до 0,825. Вважаємо, що це пов'язано з розвитком тріщин в різних (за значеннями та градієнтом) полях залишкових зварювальних напружень, внаслідок послідовного виконання чотирьох кутових швів ручним дуговим зварюванням при виготовленні зразків. Геометричні розміри початкових тріщин фіксували відразу після руйнування зразків (табл. 1), проте, внаслідок швидкого окислення поверхні зламів, деякі представлені на рис. 3 тріщини видаються більше за свої реальні розміри. Руйнування всіх зразків відбувалося по лінії сплавлення, яка містила початкову тріщину втоми. Залишкова циклічна довговічність таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими тріщинами глибиною до 1 мм після корозійних випробувань в умовах нейтрального соляного туману протягом 1200 год у 1,5...2,0 рази нижча довговічності зварних з'єднань у вихідному стані після відповідних корозійних випробувань. Зі збільшенням глибини початкової тріщини залишкова довговічність з'єднань значно знижується (табл. 1, рис. 2). При глибині втомної тріщини більше 3,5 мм залишкова довговічність з'єднань знижується в 10 разів.

Залишкова циклічна довговічність таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД після утворення поверхневих тріщин втоми, витримки у камері соляного туману КСТ-1 протягом 1200 год та посліду-ючого ВМП наведена у табл. 2 та рис. 2. В табл. 2

також приведено розміри поверхневих тріщин, які були встановлені після випробувань на втому при дослідженні поверхонь зламу зразків завдяки застосуванню індикаторної рідини. Геометричні розміри початкових тріщин фіксували відразу після руйнування зразків (табл. 2), проте, внаслідок швидкого окислення поверхні зламів деякі представлені на рис. 4 тріщини видаються більше за свої реальні розміри. Руйнування зміцнених ВМП зразків відбувалося переважно по лінії сплавлення (рис. 5). Два зразки (№2200 і №2204), які містили тріщини втоми довжиною 5...7 мм (розміри визначені методом газової проби під час підростання тріщини), після зміцнення ВМП зруйнувалися віддалік від зварного шва по основному металу внаслідок зародження нових тріщин від корозійних каверн у поверхневому гарячекатаному шарі металу (рис. 4, рис. 5). Це не дозволило достовірно визначити глибину початкових тріщин, проте, враховуючи дані табл. 1 і табл. 2, можна стверджувати, що на момент зміцнення ВМП їх глибина не перевищувала 1,6 мм. Експериментально встановлено, що ефективність застосування технології ВМП з метою підвищення залишкової циклічної довговічності фактично визначається геометричними розмірами тріщини втоми до обробки. Так, зміцнення технологією ВМП таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною 5...7 мм (глибиною до 1,6 мм) суттєво збільшує їх циклічну довговічність. Розкид експериментальних да-

них таких з'єднань знаходиться в межах розкиду з'єднань, зміцнених ВМП на стадії виготовлення (без накопичених втомних пошкоджень) та послідууючої витримки в камері КСТ протягом 1200 год (рис. 2). Після зміцнення ВМП залишкова циклічна довговічність з'єднань з поверхневими тріщинами довжиною 10...12 мм (глибиною від 1,8 до 3,0 мм) знаходиться на рівні циклічної довговічності

незміцнених зварних з'єднань після витримки в камері КСТ протягом 1200 год, тобто в 2...3 менша ніж зміцнених ВМП на стадії виготовлення. Застосування технології ВМП до зварних з'єднань, які містять тріщини втоми глибиною біля 6 мм неефективно (табл. 2, рис. 2).

Таким чином, встановлена висока ефективність застосування технології ВМП для підвищення ци-

Таблиця 2. Циклічна довговічність таврових зварних з'єднань з корозійними пошкодженнями та поверхневими тріщинами втоми після їх зміцнення технологією ВМП

Номер зразка	$l_{тр}$, мм	$h_{тр}$, мм	$N_{тр}$, цикли	$\sigma_{тр}^{зміц}$, МПа	$N_{тр}^{зміц}$, цикли	Примітка
2197	10	3,0	826700	240	147900	Руйнування по лінії сплавлення
2198	5	1,6	804100	240	407600	—«—
2199	20	5,9	770400	240	7700	—«—
2200	5**	-	481200	260	275500	Руйнування по основному металу на відстані 55 мм від шва
2201	12	2,4	760100	260	91700	Руйнування по лінії сплавлення
2202	7 +3*	1,6 +0,6*	1281700	240	368200	—«—
2203	5+10+5*	0,5+1,8+0,6*	452800	220	199300	—«—
2204	7**	-	764300	220	522800	Руйнування по основному металу на відстані 55 мм від шва

Примітка. $l_{тр}$ і $h_{тр}$ – довжина і глибина тріщини до корозійних випробувань, відповідно; $N_{тр}^{зміц}$ – циклічна довговічність до зародження тріщини заданої довжини; $\sigma_{тр}^{зміц}$ – максимальні напруження циклу, які прикладалися до зразка з тріщиною після корозійних випробувань у камері КСТ-1 протягом 1200 год та зміцнення за технологією ВМП; $N_{тр}^{зміц}$ – залишкова циклічна довговічність зразка з тріщиною заданої довжини та корозійними пошкодженнями після зміцнення технологією ВМП; * – зразки, які мали кілька окремих поверхневих тріщин вздовж однієї лінії сплавлення; ** – зразки, в яких довжину тріщини встановлювали методом газової проби

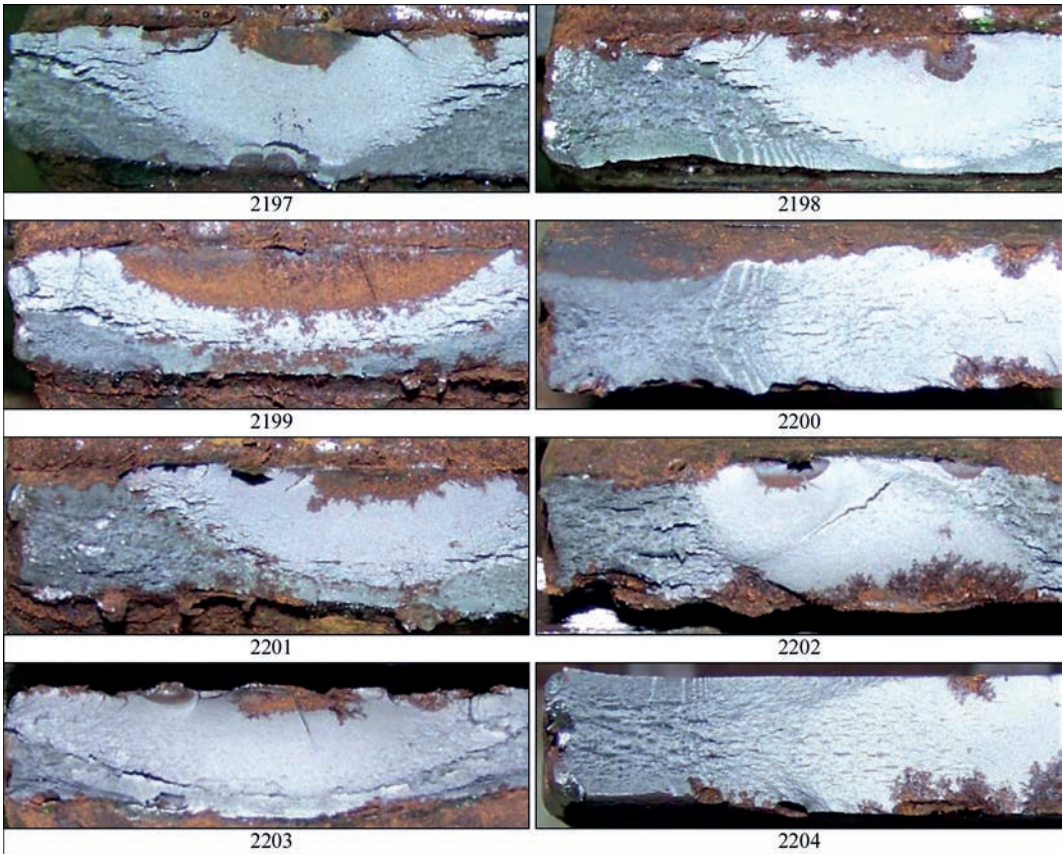


Рис. 4. Втомні злами зразків таврових зварних з'єднань сталі 15XCHД з поверхневими втомними тріщинами, які зміцнювали ВМП після витримки у камері КСТ-1 протягом 1200 год (див. табл. 2)



Рис. 5. Випробувані на втому зразки таврових зварних з'єднань сталі 15XCHD з поверхневими втомними тріщинами, які зміцнювали ВМП після витримки у камері КСТ-1 на протязі 1200 год

клічної довговічності таврових зварних з'єднань металоконструкцій, які внаслідок тривалої експлуатації в умовах помірного клімату прибережних областей України містять поверхневі тріщини втоми довжиною до 5...7 мм та характерні корозійні пошкодження.

Висновки

1. Експериментально досліджено залишкову довговічність таврових зварних з'єднань сталі 15XCHD з поверхневими тріщинами втоми та корозійними пошкодженнями, характерними металоконструкціям після тривалої експлуатації в умовах морського клімату. Тривалий вплив атмосфери морського клімату, який характерний для прибережних областей України, моделювали експонуванням з'єднань в камері соляного туману КСТ-1 протягом 1200 год. Підтверджено, що зі збільшенням довжини початкової тріщини залишкова довговічність з'єднань з корозійними пошкодженнями знижується. Залишкова циклічна довговічність таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами довжиною 2...5 мм (глибиною до 1 мм) після корозійних випробувань в умовах нейтрального соляного туману протягом 1200 год у 1,5...2,0 рази нижча довговічності зварних з'єднань у вихідному стані після відповідних корозійних випробувань, а залишкова довговічність з'єднань з тріщинами втоми 20 мм (глибиною більше 3,5 мм) знижується в 10 разів.

2. Досліджено застосування технології ВМП для збільшення залишкової довговічності таврових зварних з'єднань сталі 15XCHD з поверхневими тріщинами втоми та корозійними пошкодженнями, характерними металоконструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату прибережних областей України. Встановлено, що зміцнення технологією ВМП таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми до 5...7 мм (глибиною до 1,6 мм) збільшує їх залишкову циклічну довговічність до рівня зварних

з'єднань, зміцнених ВМП на стадії виготовлення. Після зміцнення зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною 10...12 мм (глибиною від 1,8 до 3,0 мм) їх залишкова довговічність знаходиться на рівні циклічної довговічності незміцнених зварних з'єднань, тобто в 2...3 менша ніж зміцнених ВМП на стадії виготовлення. Показано, що застосування технології ВМП до зварних з'єднань, які містять тріщини втоми глибиною близько 6 мм не призводить до підвищення циклічної довговічності та є неефективним.

Література/References

1. Poja Shams-Hakimi, Farshid Zamiri, Mohammad Al-Emrani, Zuheir Barsoum (2018) Experimental study of transverse attachment joints with 40 and 60mm thick main plates, improved by high-frequency mechanical impact treatment (HFMI). *Engineering Structures*, **155**, 251-266.
2. Lefebvre, F., Peyrac, C., Elbel, G., et al. (2017) HFMI: Understanding the mechanisms for fatigue life improvement and repair of welded structures. *Welding in the World*, **4**, 789-799.
3. Abbasi, A., Amini, S., Sheikhzadeh, G.A. (2018) Effect of ultrasonic peening technology on the thermal fatigue of rolling mill rolls. *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, **5-8**, 2499-2513.
4. Kudryavtsev, Y. (2018) *Rehabilitation and repair of welded elements by ultrasonic peening*. International Institute of Welding. IIV Document XIII-2076-05.13 p..
5. Harati, E., Swensson, L.E., Karlsson, L., Widmark, M. (2016) Effect of high frequency mechanical impact treatment on fatigue strength of welded 1300 MPa yield strength steel. Pt 1. *Int. J. of Fatigue*, **92(10)**, 96-106.
6. Zhang, H., Wang, D., Deng, C. (2018) Optimal preparation process for fatigue specimens treated by ultrasonic peening. *Experimental Techniques*, **42(2)**, 199-207.
7. Takanori Deluchi, Masashi Mouri, Junya Hara, et al. (2012) Fatigue strength improvement for ship structures by ultrasonic peening. *J. of Marine Sci. and Technology*, **17(3)**, 360-369.
8. Fisher, J.W., Statnikov, E., Tehini, L. (2002) Fatigue strength improvement of bridge girders by ultrasonic impact treatment (UIT). *Welding in the World*, **9-10**, 34-40.
9. Fikri Bashar Yalchiner, Zuheir Barsoum (2017) Life extension of welded structures using HFMI Techniques – potential application to offshore structures. *Procedia Structural Integrity*, **5**, 377-384.
10. Kirkhope, K.J., Bell, R., Caron, L., et al. (1999) *Weld detail fatigue life improvement techniques*. Pt 2: Application to ship structures. *Marine Structures*, **12(7-8)**, 477-496.
11. Martinez L.L. (2011) Life extension of FPSO's structural details using ultrasonic peening. *Procedia Engineering*, **10**, 1059-1068.
12. Knysh, V.V., Solovei, S.O., Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.O. (2019) The influence of marine environment on fatigue life of butt welded joints of 15XCHD steel, strengthened by high-frequency mechanical impact. *Materials Sci.* (English version in publ. during month).
13. Knysh, V.V., Solovei, S.O., Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.O. (2018) Influence of hardening by high-frequency mechanical impacts of butt welded joints made of 15KhSND steel on their atmospheric corrosion and fatigue fracture resistance. *Ibid.*, **54 (3)**, 421-429.
14. Knysh, V.V., Solovej, S.A., Nyrkova, L.I., Shitova, L.G. and Kadyshchev, A.A. (2016) Influence of corrosion damage on cyclic fatigue life of tee welded joints treated by high-frequency mechanical peening. *The Paton Welding J.*, **9**, 42-46.

INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY PEENING AND ATMOSPHERE
OF MARINE CLIMATE ON THE CYCLIC LIFE OF T-WELDED JOINTS
WITH SURFACE FATIGUE CRACKS

Knysh V.V., Solovei S.O., Nyrkova L.I., Kot V.G., Grishanov A.O.

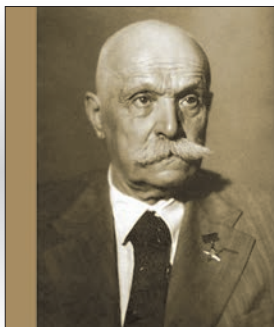
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

The given results of investigations of the efficiency of the application of high-frequency mechanical peening technology to increase the residual life of welded joints of 15KhSND steel with surface fatigue cracks of 2...20 mm length and corrosion damages typical for structures after a long-term operation in the conditions of marine climate are presented. The long-term influence of the atmosphere of maritime climate, which is typical for coastal regions of Ukraine, on the state of the surface of the joints was modelled by the exposure of samples in the salt fog chamber KST-1 during 1200 h. It was shown that surface cracks and corrosion damages significantly reduce the residual cyclic life of welded joints. It was experimentally found that reinforcement of HMP of T-welded joints with surface fatigue cracks of 5...7 mm length (depth is up to 1.6 mm) and characteristic corrosion damages increases their residual cyclic life to the level of welded joints with corrosion damages, strengthened by high-frequency mechanical peening at the stage of manufacturing. It is shown that at the presence of fatigue cracks of 20 mm length (about 6 mm depth), their residual life is reduced by up to 10 times, and the use of high-frequency mechanical peening technology for such joints does not increase the cyclic life and is inefficient. 14 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: T-welded joint, corrosive medium, fatigue, accelerated corrosion tests, salt fog, high-frequency mechanical peening, increase in cyclic life.

Надійшла до редакції 19.02.2020

НОВІ ВИДАННЯ



Є.О. ПАТОН

Патон Є. О.
Фотоальбом. — Київ: Горобець, 2020 — 116 с., іл.
Фотоальбом виданий до 150-річчя від дня народження академіка Євгена Оскаровича Патона. В альбомі представлено фотолітопис, що висвітлює діяльність Є.О. Патона в галузі мостобудування, зварювання.
У фотоальбомі використано фотографії з архівів Президії НАН України, Інституту електрозварювання, Державного політехнічного музею при НТУУ КПІ імені Ігоря Сікорського.



Кусков Ю.М., Рябцев И.А., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. **Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлосодержащих отходов.** (Под общей редакцией д.т.н., проф. И.А. Рябцева). К.: Интерсервис, 2020. — 288 с.
В книге обобщен опыт ученых ИЭС им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, других организаций стран СНГ и промышленно развитых стран в области разработки технологий, материалов и оборудования для ЭШН и электрошлаковых процессов рециклинга металлических и металлосодержащих отходов, т.е. возвращения отходов производства в круговорот «производство – потребление». Рассмотрены проблемы физико-химического взаимодействия электродного и присадочного металла и шлака и особенности этого взаимодействия в упомянутых электрошлаковых процессах. Описаны технологии и техника основных способов ЭШН и рециклинга, приведены примеры их промышленного применения. Рассмотрены дефекты, которые появляются при ЭШН в зоне сплавления и в наплавленном металле, рассмотрены причины их появления, описаны меры по их предупреждению.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занятых в области наплавочного и сварочного производства. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам технических университетов.
ISBN 978-617-696-939-6

- Книга содержит следующие разделы.
1. Сущность процессов электрошлаковой наплавки (ЭШН) и электрошлакового рециклинга (ЭШР). Классификация и характеристика способов ЭШН и ЭШР.
 2. Наплавочные материалы для ЭШН и материалы, используемые для ЭШР.
 3. Классификация и характеристика основных групп наплавленного металла на основе железа.
 4. Физические и металлургические процессы при ЭШН и ЭШР.
 5. Технология и техника ЭШН и ЭШР. Примеры их промышленного применения.
 6. Проплавление основного металла при ЭШН и методы его регулирования.
 7. Дефекты в зоне сплавления и наплавленном металле, их происхождение и предупреждение.
 8. Механическая обработка наплавленных деталей и контроль качества наплавленного металла.
- Список литературы.

З фотоальбомом та книгою можна ознайомитись у бібліотеці ІЕЗ ім. Є.О. Патона.
Замовлення на видання прохання направляти до редакції журналу «Автоматичне зварювання».

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЯВУ СИНЕРГЕТИЧНОГО ЕФЕКТУ ПРИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОМУ ЗВАРЮВАННІ СТАЛІ SUS304 З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДИСКОВОГО ЛАЗЕРА

В.Ю. Хаскін¹, В.М. Коржик^{1,2}, А.В. Бернацький², А.М. Войтенко², Є.В. Ілляшенко², Д. Cai¹

¹Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона). 510650, м. Гуанчжоу, Тіаньхе, вул. Чансін, 363, Китай

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

В роботі показано, що при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі SUS304 товщиною 3 мм з використанням випромінювання дискового лазера зафіксовано стабільний прояв синергетичного ефекту і співвідношення потужностей лазерної і плазмової складових 1:1...1:3, що дозволяє збільшити глибину провару приблизно на 25 % без зміни швидкості зварювання. На стабільність синергетичного ефекту і підвищення глибини провару впливають співвідношення потужностей складових процесу, спосіб подачі і склад захисного газу. Для поліпшення ефективності гібридного зварювання при коаксильній подачі захисного та плазмоутворюючого газів доцільно використовувати домішок 2...3 % кисню в захисний газ аргон. Стабілізація синергетичного ефекту за рахунок вибору параметрів режиму і складу захисного газу дозволяє замінити до 40 % лазерної потужності плазмовою. Міцність одержуваних гібридним лазерно-плазмовим зварюванням з'єднань з нержавіючої сталі SUS304 становить близько 95 % міцності основного металу. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: лазерно-плазмове зварювання, нержавіюча сталь, синергетичний ефект, технологічні експерименти, глибина провару, співвідношення потужностей, захисний газ

В останні роки спостерігається активний розвиток процесів гібридного лазерно-дугового (лазерно-плазмового) зварювання сталей і сплавів [1, 2]. Інтерес до цих процесів викликаний, в першу чергу, новими технологічними можливостями, що відкриваються за рахунок їх застосування. Це пов'язано з проявом синергетичного ефекту (іноді називають його гібридним ефектом), який виражається в порушенні адитивності теплового впливу випромінювання і дуги на зварюваний метал, інтенсифікації динамічного впливу зварювального струму на ванну розплаву, а також в зміні гідродинаміки самої ванни. В результаті підвищується ефективний ККД процесу зварювання і енергія, використовувана на плавлення металу, може більш ніж в два рази перевищувати суму відповідних енергій, що виділяються в металі при використанні кожного окремо взятого джерела тепла [3].

Однак, як показує ряд досліджень, прояв синергетичного ефекту в гібридних лазерно-дугових процесах не завжди може давати очікуваний позитивний результат, який виражається в збільшенні глибини провару. Наприклад, в роботі [4] показано, що прояв синергетичного ефекту, прив'язка дугової плазми до зони дії лазерного випромінювання і стабільність процесу на високих швидкостях, більшою мірою залежать від ступеня фоку-

сування лазерного випромінювання, ніж від його довжини хвилі (рис. 1). У роботі [5] відзначено, що ефективність гібридного лазер-TIG зварювання в значній мірі залежить від виду захисного газу і використовуваної методики захисту. У роботі [6] показано, що при гібридному проплавленні нержавіючих сталей на глибину провару впливають розташування (по ходу зварювання) складових джерел енергії і відстань між ними, а також величина зварювального струму TIG складової. Це робить актуальним вивчення питання результативності синергетичного ефекту та стабільності його впливу на збільшення глибини провару.

Метою даної роботи є визначення на підставі дослідження прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі можливостей підвищення глибини проплавлення і часткової заміни потужності лазерного випромінювання плазмовою потужністю.

Для визначення результативності прояву синергетичного ефекту в процесі гібридного лазерно-плазмового зварювання виконували провари і зварювання встик пластин товщиною $\delta = 3,0$ мм зі сталі SUS304 (аналог 08X18H10) в захисті аргону. Наявність наскрізного провару визначалася за критерієм формування зворотного валика шириною не менше 0,5 мм при одночасному якісному

В.Ю. Хаскін – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, В.М. Коржик – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,
А.В. Бернацький – <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>, А.М. Войтенко – <https://orcid.org/0000-0003-4946-6517>,
Є.В. Ілляшенко – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>, Д. Cai – <https://orcid.org/0000-0003-2249-6097>
© В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, А.В. Бернацький, А.М. Войтенко, Є.В. Ілляшенко, Д. Cai

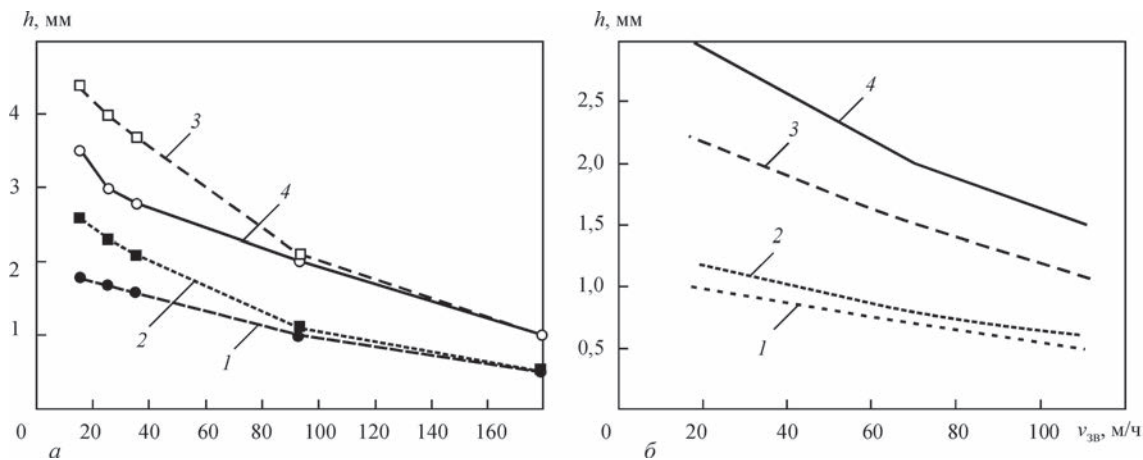


Рис. 1. Залежності глибини проплавлення h від швидкості v_{38} лазерно-плазмового зварювання з використанням випромінювання діодного лазера [4]: а – потужністю 2 кВт і аргонної плазми 2 кВт для нержавіючої сталі SUS321; б – потужністю 1,2 кВт і аргонної плазми 0,8 кВт для алюмінієвого сплаву 5083 (1 – лазерне зварювання; 2 – плазмове; 3 – лазерне + плазмове (арифметична сума значень h); 4 – гібридне)

формуванні верхнього валика. Підрізи і провисання верхнього валика, пори і свищі розглядалися як неприпустимі дефекти формування шва.

Технологічні дослідження процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання проводилися згідно зі схемою, наведеною на рис. 2. В ході експериментів застосовували дисковий лазер з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,03$ мкм, потужність якого змінювали в межах 0,3...1,4 кВт. Діаметр фокальної плями становив близько 0,4 мм. Для досліджень застосовували інтегрований коаксіальний плазмотрон прямої дії зі штирьовими катодами, конструкція якого детально описана в роботі [7]. Потужність стиснутої дуги становила до 2,3 кВт при зварювальному струмі до 80 А. Сфокусоване

лазерне випромінювання і стиснута дуга виводилися спільно через спільне сопло діаметром 2, 5 мм на зварюваний зразок, розташований на відстані близько 3 мм від зрізу сопла. Фокальну площину лазерного випромінювання розташовували на глибині близько 0,5 мм щодо поверхні зразка. В експериментах застосовували стиснуту електричну дугу неперервної дії прямої полярності. В якості зразків для зварювання встик і виконання проплавлень використовували листи сталі SUS304 розміром 200×100×3 мм. Інтегрований плазмотрон переміщували щодо зварюваного зразка за допомогою антропоморфного робота KUKA KR30HA (рис. 3).

У зв'язку із зазначеним в роботі [5] впливом виду і способу подачі захисного газу на одержувані результати, проведення експериментів було розпочато з дослідження особливостей подачі захисного газу в зону формування зварювальної ванни. Газ подавали через захисне сопло, виконане коаксіально плазмоутворюючому соплу. При цьому використовували два способи: отримання ламінарного потоку аргону і потоку аргону з завихреннями (турбулентностями). Встановили, що при гібридному лазерно-плазмовому

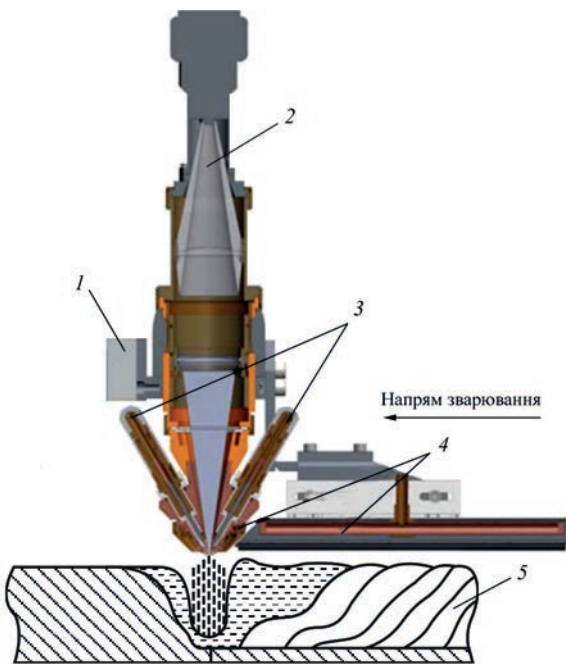


Рис. 2. Схема проведення експериментів: 1 – кріплення інтегрованого плазмотрона на руці робота; 2 – підведення лазерного випромінювання; 3 – катодні вузли; 4 – газовий захист; 5 – зварюваний зразок

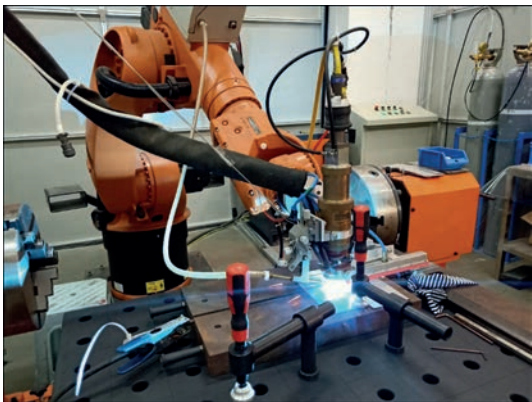


Рис. 3. Зовнішній вигляд стенду для лазерно-плазмового зварювання із застосуванням робота KUKA KR30HA в процесі роботи

зварюванні коаксіальна ламінарна подача аргону призводить до значного (до двох разів) зниження глибини проплавлення і певного збільшення ширини швів у порівнянні з гібридним зварюванням з використанням турбулентної подачі аргону. Це пояснюється попаданням певної кількості атмосферного повітря у зварювальну ванну за рахунок його змішування з аргонном, що подається турбулентним чином. Відзначимо, що таке потрапляння повітря в зварювальну ванну призводить до утворення пор в зварних швах (рис. 4).

З дослідження [8] відомо, що газова композиція на основі аргону, яка включає кисень у кількості приблизно від 0,6 до 1,9 %, дозволяє значно підвищити швидкість зварювання, допуск на стикову крайок і мінімізувати пропалювання при збереженні високих механічних характеристик. Внутрішні пори при цьому не виникають. Також

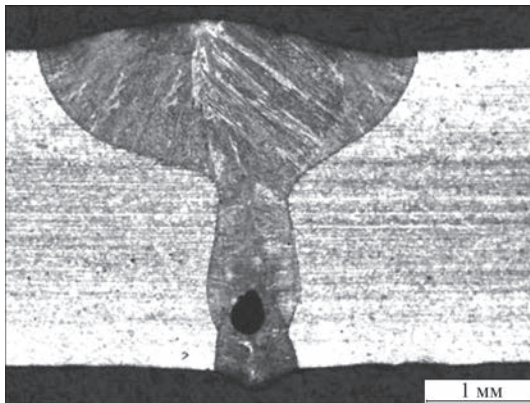


Рис. 4. Структура зварного з'єднання сталі SUS304, отриманого лазерно-плазмовим способом, з утворенням пор в нижній частині шва

відомі роботи, в яких доля кисню в захисному газі при зварюванні складала 3 % і вище. Тому для усунення негативного явища пороутворення при збереженні позитивного ефекту збільшення глибини провару було прийнято рішення в якості захисного газу використовувати суміш аргону з невеликою (2...3 %) домішкою кисню.

Після коригування складу захисного газу на різних режимах був виконаний ряд лазерних, плазмових і лазерно-плазмових проварів в пластині зі сталі SUS304 (рис. 5). Потім були зварені стикові з'єднання (рис. 6). Зі стикових з'єднань вирізали зразки для визначення механічних властивостей отриманих з'єднань. За глибиною і формою проварів, виконаних в пластині зі сталі SUS304, визначали характер прояву синергетичного ефекту і його стабільність. Для цього виконували поперечні перерізи проварів і досліджували їх макроструктури (рис.7). Режими виконання проварів і отриманий результат (величини ширини B верхнього валика і глибини H провару) наведено в таблиці.

В ході проведення експериментів була встановлена висока стабільність прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталі SUS304 в обраному діапазоні потужностей лазерної і плазмової складових за умови дотримання співвідношення цих потужностей близьким до 1:1,0...1:1,5. При зниженні потужності лазерного випромінювання з 1,4 до 0,3...0,4 кВт з одночасним збереженням зварювального струму на рівні 80 А (потужність плазмової складової – близько 2,3 кВт), тобто при співвідношенні потужностей

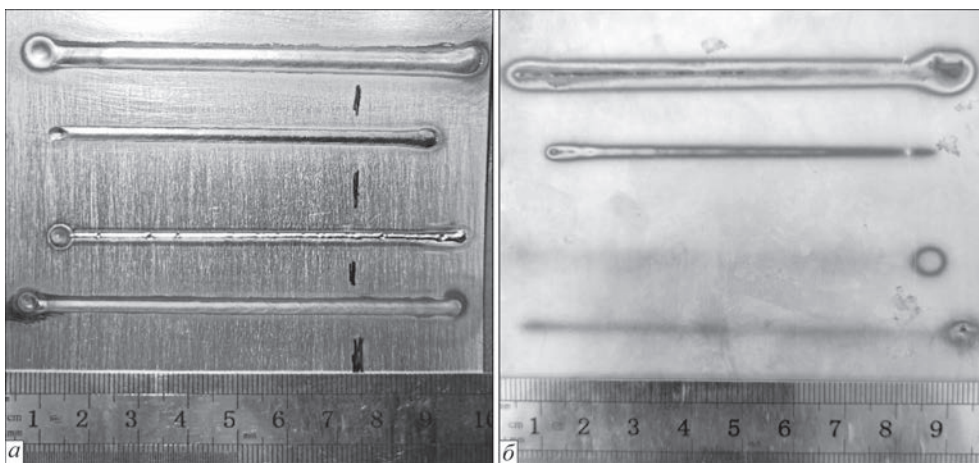


Рис. 5. Зовнішній вигляд проварів в пластині сталі SUS304 товщиною $\delta = 3,0$ мм: a – верхня сторона; b – зворотна сторона

Параметри режимів зварювання і геометричні характеристики проварів в сталі SUS304 ($\delta = 3,0$ мм), виконаних в захисті аргону зі швидкістю 60 м/год (1,0 м/хв)

Номер зразка	Вид зварювання	Потужність випромінювання, кВт	Зварювальний струм, А	Ширина B верхнього валика шва, мм	Глибина H провару, мм	Коефіцієнт форми шва $K = B/H$
D-1	Гібридне	1,4	80	3,94	3,46	1,2
D-2	Лазерне	1,4	–	2,55	2,55	1,0
D-3	Плазмове	–	80	1,83	0,25	7,3
D-4	Гібридне	0,7	40	2,31	1,84	1,3

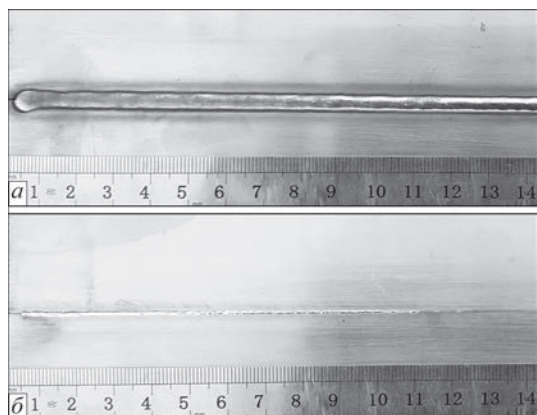


Рис. 6. Зовнішній вигляд стикового з'єднання сталі SUS304 ($\delta = 3,0$ мм): *a* – верхній валик; *b* – корінь шва

порядку 1:6, спостерігалось зменшення глибини провару з одночасним збільшенням його ширини. Форма поперечного перерізу шва при цьому наближалася до форми плазмового проплавлення, що дозволило зробити висновок про зниження стабільності прояву синергетичного ефекту.

Як впливає з таблиці, сума глибин лазерного (зразок D-2) і плазмового (зразок D-3) проварів становить 2,8 мм, тобто близько 20...25 % глибини гібридного лазерно-плазмового провару (зразок D-1). У разі заміни половини (0,7 кВт) лазерної потужності плазмовою (зразок D-4) глибина провару становить близько 75 % від глибини, отриманої при лазерному зварюванні з повною потужністю 1,4 кВт (зразок D-2). Подальші експерименти показали, що при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі з використан-

ням випромінювання дискового лазера можливо замінити 40 % лазерної потужності плазмовою. При цьому співвідношення лазерної і плазмової потужностей в гібридному процесі має становити 1:3. Аналіз коефіцієнтів форми шва показав, що формування швів при гібридному зварюванні значно ближче до лазерного, ніж до плазмового зварювання (таблиця).

Зі зварених лазерно-плазмовим способом з'єднань сталі SUS304 ($\delta = 3,0$ мм) вирізали зразки типу XIII (XIIIa) (ГОСТ 6996-66) для проведення механічних випробувань. Випробування на статичне розтягування виконували за допомогою розривної машини типу MTS Criterion 45 за трьома зразками з подальшим усередненням результатів. Було встановлено, що міцність одержуваних лазерно-плазмовим способом з'єднань становить $\sigma_b \approx 750$ МПа, тобто близько 95 % міцності основного металу SUS304. При цьому відносне подовження $\delta \approx 60$ %, тобто 100 % щодо основного металу.

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. При лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі SUS304 товщиною $\delta = 3,0$ мм з використанням випромінювання дискового лазера зафіксовано стабільний прояв синергетичного ефекту в діапазоні співвідношення потужностей лазерної і плазмової складових 1:1...1:3, що дозволяє збільшити глибину провару приблизно на 25 % без зміни швидкості зварювання, а також замінити до 40 % лазерної потужності плазмовою.

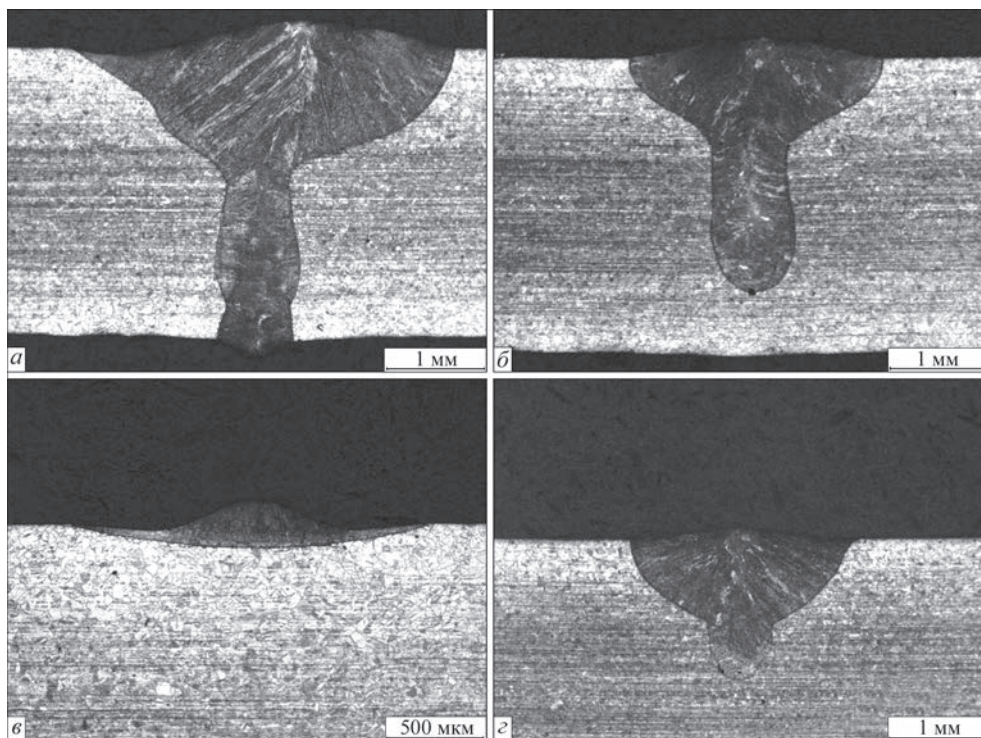


Рис. 7. Макроструктура поперечних перерізів проварів, виконаних в пластині сталі SUS304 товщиною $\delta = 3,0$ мм різними способами: *a* – гібридним (зразок D-1); *b* – лазерним (зразок D-2); *v* – плазмовим (зразок D-3); *z* – гібридним з половинною потужністю (зразок D-4)

2. На стабільність синергетичного ефекту і підвищення глибини провару впливають співвідношення потужностей складових процесу, спосіб подачі і склад захисного газу. Для поліпшення ефективності гібридного зварювання при коаксіальній подачі захисного і плазмоутворюючого газів доцільно використовувати добавку 2...3 % кисню в захисний газ аргон.

3. Міцність одержуваних гібридним лазерно-плазмовим зварюванням з'єднань з нержавіючої сталі SUS304 становить близько 95 % міцності основного металу, а відносне подовження є аналогічним даному параметру основного металу. Для більшості зварювальних завдань наведені показники є задовільними.

Робота виконувалася в рамках проектів: №2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (науково-дослідні розробки лазерних і плазмових технологій гібридного зварювання та різання)», Guangzhou, China, № 2017GDASCX-0411 Capacity-Building of Innovation – Driven Development for Special Fund Projects програм Академії наук провінції Гуандун (КНР) «Дослідження фізико-хімічних процесів при взаємодії парової плазми з поверхнею металів і розробка наукових основ технології водо-повітряного плазмового різання листових сталей для отримання зварних з'єднань»; 2018A050506058 «Research and application of hybrid laser and arc welding technology with high power on high strength steel for ship building (Дослід-

ження та застосування гібридної технології лазерного та дугового зварювання з високою потужністю на високоміцній сталі для суднобудування)».

Список літератури/References

1. Utsumi A., Matsuda J., Yoneda M., Katsumura M. (2002) Effect of base metal travelling direction on TIG arc behaviour. Study of high-speed surface treatment by combined use of laser and arc welding (Report 4). *Welding International*, 16, 7, 530–536.
2. Cho Won-Ik, Na Suck-Joo (2007) A Study on the Process of Hybrid Welding Using Pulsed Nd:YAG Laser and Dip-transfer DC GMA Heat Sources. *J. of Welding and Joining*, 25, 6, 71–77.
3. Seyffarth P., Krivtsun I.V. (2002) Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment. London, Taylor and Francis Books. (Welding and Allied Processes).
4. Shelyagin V.D., Krivtsun I.V., Borisov Yu.S. et al. (2005) Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies. *The Paton Welding J.*, 8, 44–49.
5. Kah P., Salminen A., Martikainen J. (2010) Laser-arc hybrid welding processes (Review). *Ibid*, 6, 32–40.
6. Naito Y., Mizutani M., Katayama S. (2003) Observation of Keyhole Behavior and Melt Flows during Laser-Arc Hybrid Welding. *Proc. of International Congress of Applications of Laser and Electro-Optics, ICALEO, 2003*, Jacksonville (USA). Jacksonville, LIA, Section A, pp. 159–167.
7. Кривцун И. В., Коржик В. Н., Хаскин В. Ю. и др. (2017) Установка нового поколения для лазерно-микроплазменной сварки. Сб. докл. Восьмой между. конф. «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов». Кривцун И.В. (ред.). Киев, Международная Ассоциация «Сварка», сс. 95–100.
8. Krivtsun, I.V., Korzhik, V.N., Khaskin, V.Yu. et al. (2017) New generation unit for laser-microplasma welding. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing. Ed. by I.V. Krivtsun*. Kiev, IAW, 95–100.
9. William de Abreu Macedo, Vinicius de Oliveira Correia (2006) *Gas composition for arc welding. Praxair Technology, Inc., Danbury, CT (US)*. Pat. US 7071438 B2: B23K9/73.

FEATURES OF SYNERGISTIC EFFECT MANIFESTATION IN LASER-PLASMA WELDING OF SUS304 STEEL, USING DISC LASER RADIATION

V.Yu. Khaskin¹, V.M. Korzhik^{1,2}, A.V. Bernatskii², O.M. Voitenko², Y.V. Ilyashenko², D. Cai¹

¹Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding). 363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe.

²E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

It is shown in the work that at laser-plasma welding of 3 mm stainless steel SUS304, using disc laser radiation, a stable manifestation of the synergistic effect and a ratio of powers of the laser and plasma components of 1:1 – 1:3 were found, that allows the penetration depth to be increased by approximately 25% without any change in the welding speed. The stability of the synergistic effect and increase of penetration depth are affected by the ratio of powers of the process components, method of feeding and composition of the shielding gas. In order to improve the hybrid welding effectiveness at coaxial feed of shielding and plasma gases, it is rational to use an additive of 2 – 3% oxygen to shielding gas argon. Stabilization of the synergistic effect due to selection of the mode parameters and shielding gas composition allows replacing up to 40% of the laser power by plasma power. The strength of joints of stainless steel SUS304, produced by hybrid laser-plasma welding, is equal to approximately 95% of that of the base metal. 8 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: laser-plasma welding, stainless steel, synergistic effect, process experiments, penetration depth, power ratio, shielding gas

Надійшла до редакції
05.02.2020

**Правила для авторів, ліцензійні угоди, архівні випуски журналів
на сайті видавництва www.patonpublishinghouse.com.
У 2020 р. у відкритому доступі випуски журналів з 2009 по 2018 рр. в форматі *.pdf.**

ЗВАРЮВАННЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ В АВІАЦІЙНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ (Огляд)

М.В. Юрженко¹, М.Г. Кораб¹, Р.В. Колісник¹, О.П. Масючок¹, А.В. Андрєєв², В.С. Петропольський².

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

² ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева 1. E-mail: support@antonov.com

Кількість конструкцій з полімерних композитних матеріалів у авіабудуванні постійно збільшується. Традиційними у цій галузі є полімерні композити на основі термореактивних матриць, однак актуальним є використання нових термопластичних композитів, які мають низку переваг у порівнянні з термореактивними. Застосування термопластичних композитних матеріалів дозволяє активно використовувати процеси зварювання при виробництві конструкцій, що суттєво підвищує продуктивність робіт та зменшує їх вартість. Найбільше в авіабудуванні використовують три види термостійких полімерів класу поліариленів – поліетеретеркетони (РЕЕК та РЕКК), поліетерімід (РЕІ) та поліфеніленсульфід (PPS). Авіаційні конструкції характеризуються великим розмаїттям та складністю форм, тому для з'єднання їх залучають практично усі відомі способи зварювання пластмас. Активно застосовують терморезисторне зварювання полімерних матеріалів за допомогою закладних елементів з металевої сітки чи вуглецевої тканини. Для з'єднання конструкцій із електропровідних вуглецевих композитів придатна технологія індукційного зварювання. Використовують в авіабудуванні також ультразвукове зварювання, лазерне зварювання та зварювання нагрітим інструментом з непрямым нагрівом. На даний час процеси зварювання зазвичай контролюються цифровим способом зі збереженням усіх даних, однак, на порядку денному перехід до лінійного керування процесом з використанням контролю температури. У даній роботі за матеріалами європейських публікацій наведено приклади застосування різних методів зварювання при виробництві конструкцій із сучасних полімерних термопластичних композитів в авіаційній промисловості. Бібліогр. 16, рис. 9.

Ключові слова: полімерні композитні матеріали, термопласти, зварні з'єднання, терморезисторне зварювання, індукційне зварювання, ультразвукове зварювання

Провідний авіавиробник ДП «Антонов» активно співпрацює з інститутами Національної академії наук України для розробки та впровадження передових авіаційних технологій. Одним з напрямків таких робіт з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона є підготовка до застосування у вітчизняних літаках нових полімерних композиційних матеріалів [1].

В сучасному авіабудуванні значну частину деталей літака виготовляють з полімерних композитів – волокнистих або тканих матеріалів, просочених полімерними матрицями. Використання композитів дозволяє суттєво підвищити вагову ефективність авіаційно-космічних апаратів, у перспективі їх частка досягне 70...75 % конструкцій літака [2]. Традиційними у цій галузі є полімерні композити на основі термореактивних матриць, однак, постійно зростає використання нових термопластичних композитів (ТПК), які мають низку переваг у порівнянні з термореактивними.

Головним стимулом для використання ТПК в авіаційній галузі є можливість з'єднання деталей з них за допомогою зварювання. Процес зварювання є значно кращою альтернативою традиційним методам з'єднання деталей із термореактивних композитів – механічному кріпленню та клейовому з'єднанню. Інші переваги ТПК – можливість

переформовки (переплавки) в процесі ремонту та утилізації, вони не вимагають складних хімічних реакцій та тривалих процесів твердіння, не потребують особливих умов зберігання, а строк зберігання ТПК практично необмежений. В даній статті наведено огляд основних методів зварювання полімерних термопластичних композитів, що застосовуються в сучасній авіаційній промисловості.

Оскільки елементи літальних апаратів зазвичай працюють в екстремальних умовах механічних та теплових навантажень, термопластичні композити для авіації виготовляють на базі міцних та термостійких полімерних матриць. Разом з традиційними полікарбонатами та поліамідами у цій галузі широко використовують три види сполук класу поліариленів – поліетеретеркетони (РЕЕК та РЕКК), поліетерімід (РЕІ) та поліфеніленсульфід (PPS) [3]. Поліарілени – карбоциклічні полімери, в складі молекулярних ланцюгів яких присутні кільцеві бензольні ядра, які являють собою стійку хімічну структуру та забезпечують полімеру високу термічну стійкість.

Мономери поліетеркетонів, у різних комбінаціях складаються з трьох основних складових частин – проста етерна група, арильна циклічна вуглеводнева група та кетонна органічна сполука з подвійним хімічним зв'язком. В залежності від

кількості складових частин у мономері розрізняють поліетеркетон (РЕК), поліетеркетонкетон, (РЕКК), поліетеретеркетон (РЕЕК) і тому подібні. Усі ці полімери мають температуру плавлення вищу за 330 °С та можуть використовуватись як матриці ТПК.

Мономери поліетеріміду (PEI) також складаються з трьох основних частин – проста етерна група, кільцева арильна група та імідна група, похідна від карбонових кислот. PEI – це високоякісна вогнестійка термопластична матриця для ТПК, яка відноситься до групи жаростійких пластиків з термостійкістю до 200 °С. Він має високі механічну міцність, діелектричну міцність, стійкість до гідролізу, дії ультрафіолетового та гамма-випромінювання.

Мономери поліфеніленсульфіду (PPS) мають найпростішу структуру та складаються з арильної групи та атому сірки. PPS – відносно дешевий та високоякісний полімер, дуже міцний, жорсткий та щільний, а також має природну вогнестійкість та жаростійкість при температурах безперервної експлуатації суттєво вище 200 °С. PPS, також стійкий до окислення та дії хімічних речовин, поглинає мінімальну кількість води, має гарні електричні та чудові технічні властивості, а також малу вірогідність деформації [4].

Переважаюча більшість полімерних конструкцій сучасного літака виготовляється із листових композитних напівфабрикатів – препрегів. Препреги – від англійського pre-impregnated (попередньо просочений) – отримують шляхом просочення волокнистої основи (вуглецевої або скло-тканини спеціального плетіння) рівномірно розподіленим шаром полімерної матриці. Провідними виробниками сучасних композитних матеріалів як терморезистивних, так і термопластичних є компанії TenCate Advanced Composites та Porcher Industries

[5, 6]. Термопластичні композитні матеріали випускаються у наступних формах:

- семіпреги – тканини та однонаправлені волокнисті стрічки, з розташуванням шару полімерної матриці тільки на їх поверхні;

- препреги тканини та однонаправлені волокнисті стрічки, повністю просочені полімером матриці;

- термопластичні ламінати – це форма матеріалу, в якому від 1 до 24 шарів армуючого матеріалу, просоченого термопластичним сполучним, об'єднані у плоскі листи.

У обмеженій кількості зварні конструкції із ТПК використовуються в авіації вже давно та літають протягом десятиліть. На даний час авіавиробники найбільше застосовують терморезисторне зварювання (resistance welding) та індукційне зварювання (induction welding) полімерних матеріалів, використовують, також, ультразвукове зварювання (ultrasonic welding), лазерне зварювання (laser welding) та зварювання з непрямым нагрівом (conduction welding) [7].

Суть терморезисторного зварювання полягає у тому, що тепло виробляється за допомогою плоского закладного резистивного елемента, який розташований на межі розділу та залишається всередині зварного шва. Електричний струм, що пропускають крізь резистивний елемент, створює тепло та розплавляє термопластичний полімер, робочий тиск зовні на деталі сприяє утворенню зварного з'єднання після вимкнення струму та затвердіння розплавленого полімеру (рис.1). Закладні елементи, зазвичай у вигляді стрічки, виготовляють з металеві сітки або електропровідної вуглецевої тканини.

На авіасалоні в Берліні у 2018 р. компанія Premium AEROTEC (Аугсбург, Німеччина) представила демонстраційну модель гермошпангоута A320 Airbus (Тулуза, Франція). Гермошпангоут

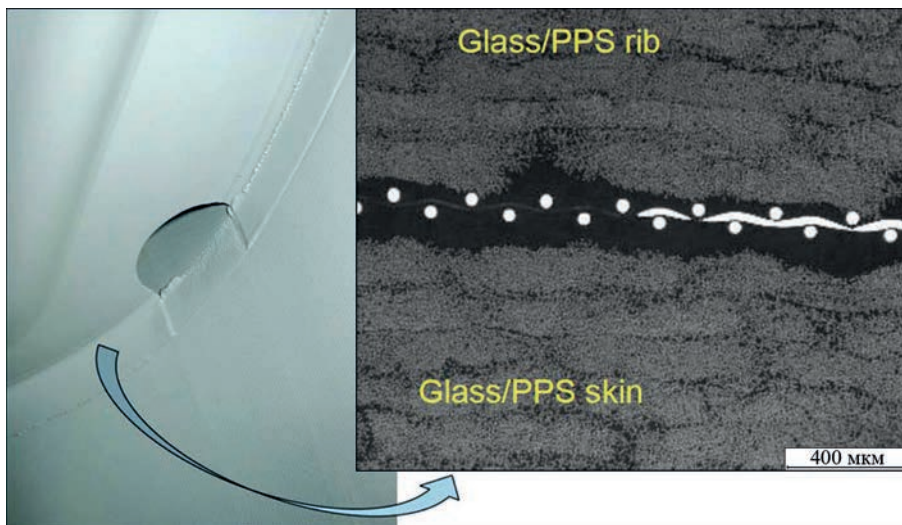


Рис. 1. Терморезисторне зварне з'єднання металевою сіткою корпусної деталі та ребра жорсткості, виготовлених із композиту поліфеніленсульфід/скловолокно [8]

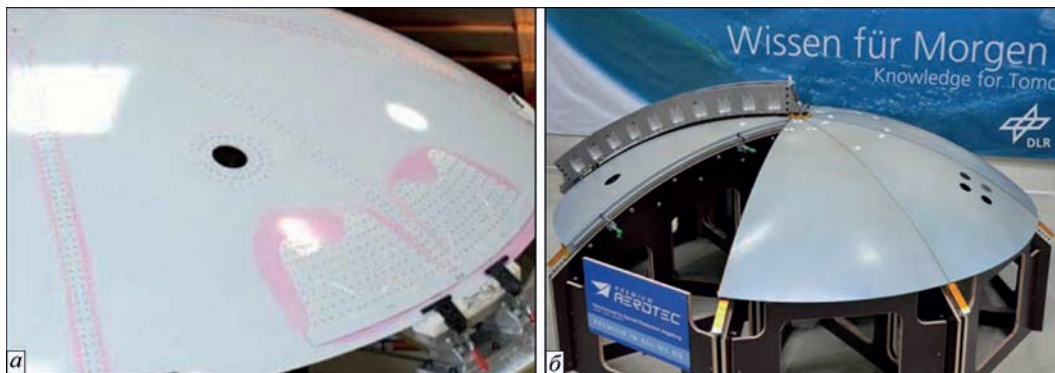


Рис. 2. Демонстраційна модель гермошпангоута Airbus A320: а – діюча версія із алюмінію з великою кількістю заклепок; б – зварна демонстраційна модель без заклепок зі «зварювальним мостом»

складалася із восьми штампованих сегментів на основі ТПК вуглетканина/PPS, з'єднаних методом терморезисторного зварювання. На демонстраційній моделі Premium AEROTEC довжина зварних швів складала біля 1,5 м.

Виготовлений за допомогою зварювання термoplastичний композитний гермошпангоут A320 пропонує рішення без заклепок у порівнянні з існуючою алюмінієвою конструкцією (рис. 2). Використання зварювання в даному випадку дозволяє економити вагу, час та вартість позиціонування та свердління отворів, а також вартість кріплення. Закладними елементами при зварюванні слугували стрічки із вуглецевого волокна.

Важливим елементом терморезисторного зварювання є робочий тиск, який необхідно прикласти до деталей, щоб отримати гарне з'єднання. Для деталей невеликого розміру робочий тиск зазвичай створюють за допомогою робота-маніпулятора, для великих деталей необхідно створювати спеціальну оснастку, яка забезпечить рівномірний тиск вздовж усього зварного шва. У даному випадку робочий тиск забезпечував вигнутий металевий «зварювальний міст», розроблений Premium AEROTEC. Він обертається займає положення над кожним із восьми зварних швів та створює рівномірний робочий тиск за допомогою десяти пневматичних циліндрів, розташованих на ньому [9].



Рис. 3. Виробництво рулів висоти та рулів напрямку методом індукційного зварювання із ТПК вуглеволокна/PPS для реактивного літака Dassault Falcon 5X

При індукційному зварюванні котушка, що живиться змінним електричним струмом великої частоти, переміщується вздовж лінії зварювання та індуктує вихровий струм в електропровідних волокнах вуглецевого композиту. Для генерації вихрового струму в вуглецевих волокнах використовується змінна напруга частотою до 1 МГц. ТПК на основі скловолокна, яке не проводить електричний струм, непридатні для індукційного зварювання [10].

Компанія KVE Composites допомогла впровадити технологію виробництва рулів висоти та рулів напрямку з використанням індукційного зварювання для літаків Gulfstream G650 та Dassault Falcon 5X [11] (рис. 3).

Компанія Composite Integrity (Porquette, Франція) використала альтернативний підхід та розробила технологію «динамічного індукційного зварювання», яка використовується для з'єднання стрингерів та оболонок фюзеляжу на основі односпрямованої вуглецевої стрічки та РЕКК в компанії STELIA Aerospace (Тулуза, Франція). Оскільки індукційні вузли, що генерують вихровий струм при зварюванні матеріалів з односпрямованими стрічками, відсутні, то було розроблено спеціальну багатопромінену індукційну котушку. У 2016 р. Composite Integrity застосувала технологію індукційного зварювання для виробництва люків доступу до паливних баків із ТПК у літаку Airbus A220 (рис. 4).

KVE Composites показала, що використання люків, виготовлених зварюванням із ТПК, дозволяє економити витрати. Навіть невеликі літаки можуть мати до 60 подібних панелей доступу, при цьому усі вони мають різну форму та виготовляються з використанням композитної сендвічної конструкції з серцевиною із стільниковим заповнювачем. За допомогою зварювання усі панелі доступу можуть бути виготовлені на одній виробничій ділянці. При цьому не має потреби обробляти сердечник – використовуються компоненти, подібні до конструктора «LEGO» – плоскі листи та штамповані ребра жорсткості, які зварюються між



Рис. 4. Люки доступу паливного бака для вузьких літаків Airbus A220, виготовлені з ТПК компанією Aviascomp з використанням технології індукційного зварювання, розробленої компанією KVE Composites

собою та утворюють різні форми. Зварювальні інструменти відносно дешеві у порівнянні з тими, що використовуються сьогодні. При використанні зварювання можливо виготовити з ТПК усі різноманітні панелі доступу літака з витратами на обладнання не більше 100 тис. дол. США, що є суттєвою економією [11].

У 2015 р. компанія Composite Integrity почала роботу над проектом STELIA Arches TP та розробила обладнання для індукційного зварювання вигнутих деталей, розміром із фюзеляж літака (рис. 5). Процес зварювання названо «динамічним», тому що роботизована установка зварює стрингери по довжині фюзеляжу, індукційна котушка рухається при зварюванні по трьом координатам, включно з вертикальним напрямком z . Стрингери та обшивка в демонстраційній моделі

STELIA мають змінну товщину. Алюмінієва направляюча слугує затискним пристроєм та запобігає зміщенню стрингера відносно обшивки при зварюванні. В демонстраційній моделі робочий тиск прикладався через два ролика на зварювальній головці, які розміщались над котушкою. Під час зварювання ролики проходять вздовж стрингера, поруч із рейкою – фіксатором, у той час, як котушка рухається по лінії шва. В даний час запатентовано нову індукційну зварювальну головку, яка використовує один ролик та покращує механічні властивості зварного шва. Установка також оснащена пристроєм для охолодження зварного шва, який подає повітря на поверхню з'єднання, доводить його температуру до рівня нижче межі кристалізації та запобігає ризику розходження елементів шва після зняття робочого тиску [9].

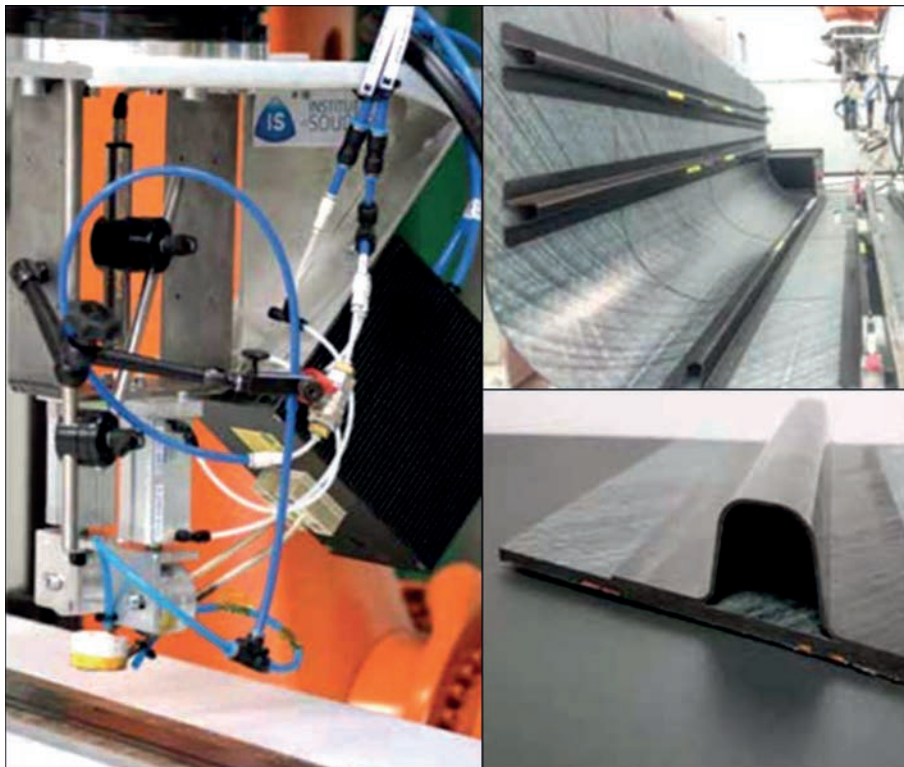


Рис. 5. Розроблена компанією Composite Integrity індукційна котушка та технологія зварювання стрингерів на основі односпрямованого вуглепластика та РЕКК з обшивкою

Компанією GKN Fokker накоплено значний досвід у застосуванні ще одного із розповсюджених способів зварювання деталей із ТПК – ультразвукового (УЗ). Установка для УЗ зварювання включає електричний генератор високочастотних (20...40 кГц) коливань, пьезоелектричний перетворювач та сонотрод, який контактує з поверхнею деталі та забезпечує нагрів та розплавлення полімерної матриці під дією механічних УЗ коливань. Цей метод традиційно застосовувався для зварювання точкових або невеликих за довжиною зварних швів [11].

У літаках Gulfstream використовували УЗ зварювання для з'єднання більше ніж 50 000 полімерних деталей, виготовлених литтям під тиском з ТПК панелями підлоги. Хоча це і точкове зварювання, але УЗ спосіб дуже швидкий та високоавтоматизований. Кронштейни фюзеляжу літака часто з'єднані заклепками або болтами з великими конструкціями, виготовленими із терморезистивного композиту. УЗ зварювання дозволяє забезпечити дуже гарне з'єднання кронштейнів, які часто виготовлені з неармованих термопластів.

Було, також, продемонстровано УЗ зварювальну головку DLR-центру (Аугсбург, Німеччина), встановлену на промисловому роботі KUKA та призначену для зварювання гермошпангоута із ТПК літака A320 як альтернативу терморезисторному зварюванню (рис. 6). Механічні випробування на L-відрив та порівняння із міцністю механічних з'єднань показали багатообіцяючі результати.

Спеціалісти із Технологічного університету Делфта (TU Delft, Делфт, Нідерланди) у своїй доповіді на конференції «31st Technical Conference, ASC» у 2016 р. заявили, що ультразвукове зварювання можна поширити на протяжні шви шляхом утворення безперервної лінії суміжних зварних точок, що частково перекриваються. Таке безперервне УЗ зварювання з отриманням послідовних

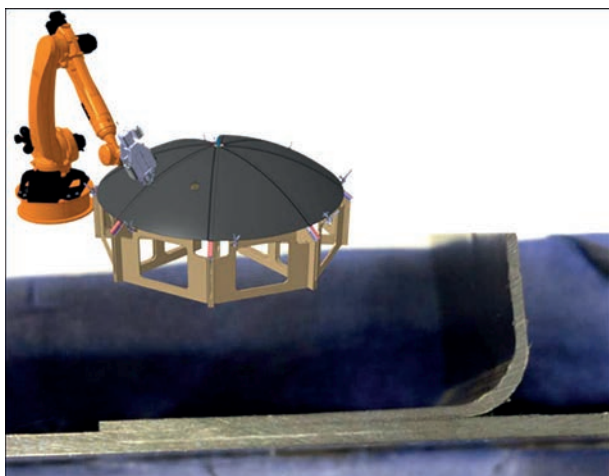


Рис. 6. Ультразвукова зварювальна головка DLR-центру та зразок зварного з'єднання із ТПК на основі односпрямованого вуглеволокна та РЕКК для випробувань на L-відрив [9]

точок у лабораторних умовах використовували для виготовлення з ТПК демонстраційної моделі панелі планера Clean Sky EcoDesign (рис. 7) [12].

Багато литих полімерних кронштейнів літака Fokker прозорі для лазера. Тому існує великий потенціал у використанні лазерного зварювання для закріплення цих кронштейнів на конструкції фюзеляжу з вуглепластика без необхідності свердління отворів. Тип армування та товщина ламінату впливають на якість зварного шва, однак, компанія LZN продемонструвала гарні результати із лазерного зварювання ламінатів із PPS та PEI, армованих скловолокном.

Компанія LZN запатентувала лазерну технологію та стала лауреатом премії JEC World Innovation Award 2018 у категорії аерокосмічних застосувань для «Модульних термопластичних панелей жорсткості», де штампована сітка жорсткості на основі термопластичного вуглепластика приварюється лазером до композитної оболонки [11].

Компанія GKN Fokker, як альтернативу індукційному, розробила нову технологію зварювання нагрітим інструментом з непрямым нагрівом. Нагрітий інструмент за принципом «праски» прикладається до зовнішньої поверхні однієї з деталей та прогріває її наскрізь із розплавленням термопласту та частковим розплавленням матеріалу нижньої деталі. Метод аналогічний відомому способу термоімпульсного зварювання полімерних плівок. Використовується малоінерційний нагрівач, завдяки чому прогрівання та охолодження якого займає всього декілька секунд. Оскільки прогрівається одразу увесь інструмент, час зварювання не залежить від довжини шва, він однаковий і для довжини 0,5, і 10 м. На виставці JEC 2014 були представлені панелі фюзеляжу з ТПК, виготовлені за допомо-

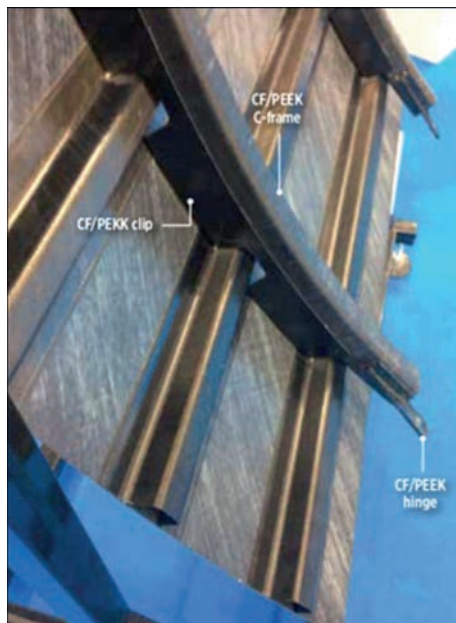


Рис. 7. Послідовне ультразвукове точкове зварювання елементів, виготовлених із ТПК вуглепластик/РЕКК

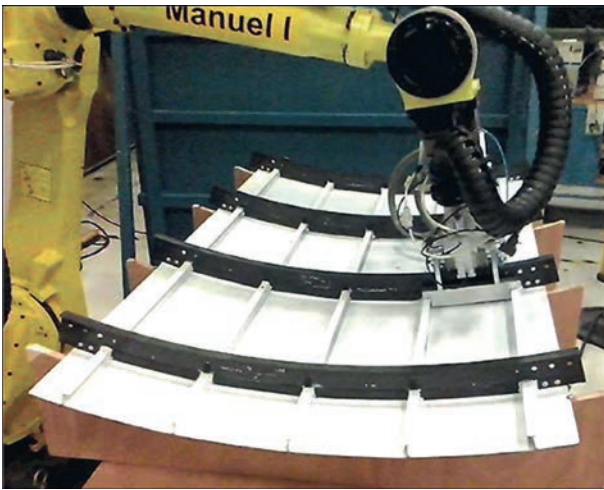


Рис. 8. Роботизована головка для зварювання елементів стрингерів фюзеляжу нагрітим інструментом із непрямим нагрівом гою нагрітого інструменту. Цей метод може добре працювати при зварюванні стрингерів довжиною 6...10 м з обшивкою фюзеляжу (рис. 8) [11].

Ключовим елементом для впровадження технології зварювання при виготовленні з ТПК конструкцій фюзеляжу літака є можливість контролювати процес зварювання та керувати їм у реальному часі. У даний час процеси зварювання контролюються цифровим способом зі збереженням усіх даних, однак, на порядку денному перехід до лінійного керування процесом з використанням контролю температури. Вважається, що розробка таких технологій для терморезисторного та індукційного зварювання потребує декількох років, а для УЗ – може з'явитись вже досить швидко. Моніторинг процесу послідовного точкового УЗ зварювання можливий на основі аналізу кривих потужності та зсуву, які видаються зварювальним апаратом та дозволяють швидко визначити оптимальні параметри зварювання. Спеціалісти авіаційної галузі вважають, що запуск у виробництво зварних великих елементів фюзеляжу літака, а, можливо, та всього зварного фюзеляжу, що не має механічних криплень, відбудеться у найближчі часи [11].

У майбутньому перспективним є також впровадження в авіаційну галузь і адитивних технологій, які на сьогодні розвиваються швидкими темпами



Рис. 9. БПЛА на 80 % 3D надрукований з полімерних матеріалів

та входять у виробничі процеси багатьох галузей промисловості [13]. В авіабудуванні та аерокосмічній галузі проектування, розробка та виробництво складних і замінних деталей є однією з актуальних частин сучасного та майбутнього застосування технологій 3D друку полімерними матеріалами [14]. Головна причина цьому – можливість суттєвого зменшення ваги деталей, виготовлених шляхом 3D друку, при збереженні їх експлуатаційних характеристик [15]. Також деталі, створені методами 3D друку, все більше використовуються і при виробництві БПЛА (рис. 9) [16].

Висновки.

Значну частку конструкцій сучасних літаків виготовляють із термопластичних полімерних композитних матеріалів на базі поліетеркетонів, поліетеріміду та поліфеніленсульфіду. Для з'єднання деталей з цих матеріалів застосовують терморезисторне, індукційне, ультразвукове, лазерне зварювання та спосіб зварювання нагрітим інструментом з непрямим нагрівом. Основними напрямками удосконалення процесів зварювання та виробництва у цій галузі вважають перехід до керування процесом у реальному часі з використанням контролю температури та застосування адитивних технологій.

Список літератури/References

1. Ківа Д. (2012) *Авіаційна галузь на крилах науки*. Віче, 21. <http://veche.kiev.ua/journal/3366/>
Kiva, D. (2012) *Aviation sector on science wings*. Viche, 21. <http://veche.kiev.ua/journal/3366/> [in Ukrainian]
2. Беліков С.Б., Волчок І.П., Мітяєв О.А., Плескач В.М., Савченко В.О. (2017) *Композиційні матеріали в авіабудуванні (огляд). Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 1*. <http://nmt.zntu.edu.ua/article/view/131033/126779>
Belikov, S.B., Volchik, I.P., Mityaev, O.A., Pleskach, V.M., Savchenko, V.O. (2017) *Composite materials in aircraft construction (Review)*. In: *New materials and technologies in metallurgy and machine building, 1*. <http://nmt.zntu.edu.ua/article/view/131033/126779> [in Ukrainian].
3. Chris Red (2014) *Thermoplastics in Aerospace Composites Outlook, 2014-2023*. Composites World, 1. <https://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-thermoplastics-in-aerospace-composites-2014-2023>
4. W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch (2015) *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*, Wiley; 5th Ed., 960.
5. <https://www.tencatecomposites.com/resources/datasheets>
6. <https://www.porcher-ind.com>
7. Da Costa A. P., Botelho E. C., Leali Costa M., Narita N. E., Tarpani J. R.. (2012) *A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications*. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 4, 3, 255-265. http://www.jatm.com.br/papers/vol4_n3/JATMv4n3_p255-266_A_Review_of_Welding_Technologies_for_Thermoplastic_Composites_in_Aerospace_Applications.pdf
8. Offringa A. (2016) *Thermoplastic composites in aerospace. Breakthrough Technologies for Advanced Manufacture*, Nottingham. http://www.sampe.org.uk/assets/documents/pdfs/AS2016/Presentations/AS2016_01_Arnt_Offringa_Fokker.pdf
9. Gardiner G. (2018) *Welding thermoplastic composites*. *Composites World*, 9, p. 50 – 63. https://sc.edu/about/centers_institutes/mcnair/documents/composites_world_september.pdf

10. Ahmed T.J., Stavrov D., Bersee H.E.N., Beukers A. (2006) *Induction welding of thermoplastic composites—an overview*. *Composites Part A*, t. 37, 10, 1638-1651. <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/induction-welding-of-thermoplastic-composites-an-overview-ps031YzeOD>
11. Gardiner G. (2008) *New horizons in welding thermoplastic composites*. <https://www.compositesworld.com/blog/post/new-horizons-in-welding-thermoplastic-composites>
12. Palardy G., Villegas I. F. (2016) Smart Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites. *Proceedings of the American Society for Composites – 31st Techn. Conf., ASC*. <https://pure.tudelft.nl/portal/files/12482685/1816.pdf>
13. *Aerospace 3D Printing Market Size, Share & Industry Analysis, By Vertical (Printers and Materials), By Industry Type (UAV, Aircraft, and Spacecraft), By Application Type (Engine Components, Space Components, and Structural Components), By Printer Technology Type (DMLS, FDM, CLIP, SLA, SLS and Others), and Regional Forecast 2019-2026*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/aerospace-3d-printing-market-101613>
14. Joshi, Sunil & Sheikh, Abdullah. (2015). *3D printing in aerospace and its long-term sustainability. Virtual and Physical Prototyping*. **10**, 1-11. 10.1080/17452759.2015.1111519. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2015.1111519?journalCode=nvpp20>
15. *3D printing in aviation – advantages and areas of application* <https://www.mototok.com/blog/3d-printing-in-aviation-advantages>
16. *TOP 10 3D Printing in Aeronautics* <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-aeronautics-010320184/>

WELDING OF THERMOPLASTIC POLYMER COMPOSITES IN THE AVIATION INDUSTRY (A REVIEW).

M.V. Iurzhenko¹, M.V. Korab¹, R.V. Kolisnyk¹, O.P. Masiuchok¹, A.S. Andreev², V. Petropolsky².

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

²Antonov Company, 1, Akademika Tupoleva Str., 03062, Ukraine, Kyiv, E-mail: support@antonov.com

The volume of polymer composite structures in the aircraft industry is steadily increasing. Polymer composites based on thermosetting mats are traditional in this field, but it is important to use new thermoplastic composites (TPKs), which have several advantages over thermosetting ones. The use of thermoplastic composite materials makes it possible to actively use welding processes in the production of structures, which significantly increases the productivity of work and reduces their cost. The most used in the aircraft industry are 3 types of heat-resistant polymers of the class of polyarylene - polyether ether ketones (PEEK and PEKK), polyetherimide (PEI) and polyphenylenesulfide (PPS). Aeronautical structures are characterized by a large variety and complexity of forms, that's why almost all known methods of plastic welding are involved for joining. The resistance welding of polymeric materials using embedded elements made of metal mesh or carbon fabric is actively used. Inductive welding technology is suitable for joining structures made of conductive carbon composites. Ultrasonic welding, laser welding, and indirect-heated hot-welding are also used in aircraft engineering. Nowadays, welding processes are usually digitally controlled with permanent data storage, but currently the agenda is to move to linear process control using temperature monitoring. This paper, based on the materials of European publications, presents examples of the application of different welding methods in the manufacture of structures made of modern polymer thermoplastic composites in the aviation industry. 16 Ref., 9 Fig.

Keywords: polymer composites, thermoplastics, welded joints, resistance welding, induction welding, ultrasonic welding.

Надійшла до редакції 13.02.2020

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

XXIII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ
НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ
та
МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
14–18 вересня 2020
Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Генеральний спонсор
ПрАТ «УкрНДІНК»



ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ
Міжнародна Асоціація «Зварювання»
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50
journal@paton.kiev.ua
posypaiko.yurii@gmail.com
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2020>

О СТАРЕЙШЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ НА ПРИМЕРЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ НАХОДОК – ЗОЛОТОГО КУБКА ИЗ ТРИАЛЕТИ И МУФЕЛЯ ИЗ КВАЦХЕЛИ

Эр. Маградзе

Национальный музей, Грузия, 0105, г. Тбилиси, ул. Фуртцеладзе, 3. E-mail: e.magradze@gmail.com

Если рассматривать этапы развития человечества с материальной и духовной точки зрения, то значительным достижением в этой области является открытие и изучение металлов, а также изобретение методов их обработки. Результатом деятельности и постоянного поиска в этом направлении является создание и развитие металлургии. Шедевры же ювелирного искусства предстают перед нами как продолжение этих процессов. Неотъемлемой частью этих процессов является накопление знаний посредством наблюдения, совершенствование усвоенных правил и приемов. Одним из наиболее важных из них является процесс пайки как способ соединения готовых деталей из металлов, который был изобретен человеком на ранней стадии человеческого развития. Библиогр. 8, рис. 8

Ключевые слова: пайка, реакционный и субстанционный припой, металлическое золото, пайка артефактов

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы представить инструменты и технологии, существующие в древнейших ювелирных мастерских, а также, опираясь на полученные результаты работ по соединению деталей при помощи пайки, сделать выводы о составе припоя и методах его применения.

Опираясь на проделанные наблюдения, могу сказать, что на древнейших изделиях наблюдаются следы двух видов припоя. Первый — это «субстанционный припой», при котором на золотое или серебряное изделие наносится расплав из небольшого количества золота или серебра (из того же металла, из которого состоит изделие), с добавлением специального легирующего металла.

И второй, так называемый реакционный припой, который содержит сложное химическое соединение органических и неорганических веществ. Под воздействием температуры это соединение, в результате восстановительной реакции, расплавляет поверхность изделий и прочно соединяет друг с другом мельчайшие детали.

Сегодня, в современных ювелирных мастерских, при пайке серебряных или золотых изделий применяется только первый метод. То есть для достижения нужных результатов и необходимой температуры используются «субстанционные припои». Для их изготовления берется золото или серебро, только в малом количестве, с добавлением легирующего металла. В их число входят: элементное серебро, медь, свинец, цинк, олово, кадмий и др. Вводя эти металлы в различных пропорциях в основной состав золота или

серебра, мы получаем особенные сплавы, которые при помощи соответствующих флюсов и температуры прочно соединяют две детали изделия [1].

При пайке используются газовые горелки, которых существует множество видов; мы можем использовать их, исходя из поставленной задачи. Они довольно просты в использовании и позволяют мастеру эффективно обрабатывать детали. Эти устройства легко регулируют пламя с помощью специального вентиля, увеличивая или уменьшая газовую струю [1].

В процессе смены культурных эпох человеческого развития ювелирное искусство стало процветать и первичное металлическое золото, необходимое для этой работы, считалось священным, оно считалось принадлежащим богам [2].

Труды многих авторов, работавших в средние века, дошедшие до наших дней, рассказывают нам как об обработке металлов в целом, так и о ювелирном деле: Аль Бирун, Теофилус, Арраз, Агрикола, Бирингучио, Челлини, Вахтанг VI и др.

Рассматривая историю обработки драгоценных металлов, исследователь не может обойти стороной одну из важнейших рукописей, принадлежащую перу бенедиктинского монаха Просвитеру Теофилусу, творившему в XI–XII веках [3].

Для нашего исследования трактат Теофилуса был особенно интересен тем, что в нем обсуждаются методы подготовки золотой основы для перегородчатой эмали и изготовление перегородок для эмали. Также он дает советы о приготовлении припоя и его использовании [3].

Теофилус рассматривает два типа припоя:

- полученный способом легирования золота или серебра;
- изготовленный из химических веществ.

Второй вид припоя, как указано выше, готовится из таких органических и неорганических соединений, которые при температуре 900...920 °C расплавляют поверхность золота или серебра и связывают две детали друг с другом. Такой метод зародился в далеком прошлом человечества, и передовые народы древнего мира использовали этот метод для создания изящных видов искусства, таких как филигрань и зернь, на основе переработки таких природных материалов как хризоколла (водный силикат меди $\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) или малахит (водный карбонат меди $\text{Cu}_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2$). Значение же состава припоя по Теофилусу в том, что он в период развитого Средневековья описывает метод изготовления данного припоя с помощью искусственных химических процессов [3].

В своем трактате о методах ювелирной пайки рассказывает итальянский ювелир и скульптор XV века Бенвенуто Челлини. Он описывает содержимое легированной (субстанциионной) пайки. Так как во время чеканки почти всегда образуются дефекты в виде отверстий и трещин, необходимо их заполнить такого типа припоем [4].

Он предлагает устранить данные дефекты только с помощью субстанциионной пайки, поскольку реакционная пайка, ввиду отсутствия субстанции, не в силах покрыть погрешности. Последняя позволяет расплавить поверхность драгоценного металла, что является хорошим способом соединения каждой маленькой детали.

П. Теофилус также указывает на необходимость подготовки легированной и субстанциионной пайки, только он, в отличие от Челлини, вместо серебра, вводит в золото медь [3].

О легировании золота медью рассказывает также грузинский ученый XVII–XVIII веков царь Вахтанг VI в своем трактате «Книга о приготовлении растворов и химических превращениях» [5].

Эти примеры ясно указывают на существование всеобщих непрерываемых знаний в области обработки драгоценных металлов, которые, хотя и были всегда строго скрываемыми, все же распространялись и принимали характерные черты одной общей культуры человечества.

После описания применения и содержания припоя, Теофилус рассказывает о том, как мастер должен выполнять свою работу по пайке. Он указывает на то, как в кучке горящего угля создать такое пространство, чтобы изделие непосредственно не соприкасалось с огнем, и определенная температура равномерно окружала бы соединяемые детали. То есть, как позже и Челлини, он пы-

тается в кучке горящих углей создать похожее на муфель пространство. Хотя Теофилусу известен способ изготовления железного муфеля для выжигания эмали и он даже описывает этот метод [3], но для пайки он все же предлагает другой способ, видимо для того, чтобы была возможность проследить за процессом. А железный муфель, необходимый для выжигания покрытых эмалью пластин, он описывает так: «Внеси пластину в огонь на тонком углубленном подносе с короткой металлической ручкой. Накрой его железной крышкой, которая должна быть вогнута, как маленькая чаша, и также полностью покрыта отверстиями... Эта крышка также должна иметь небольшое кольцо в середине, при помощи которого можно было бы ее накрыть и открыть...».

Описанное Теофилусом небольшое, изготовленное из железа приспособление, которое, по видимому, использовалось в средние века, состоит из двух независимых частей – нижнего вогнутого подноса с ручкой и круглой полусферической железной крышки с кольцом. Воссоединение этих двух деталей создает замкнутое пространство – муфель. Название «муфель» происходит от латинского слова *muffla*, по-французски *moufle*, что означает «муфта» или «закрытый».

Интересно узнать, существовало ли такое устройство в более ранние времена, и какие могли быть модификации или какие материалы должны были быть использованы.



Артефакт муфель «Колхидский колпак»

В 2012–2013 гг. в Национальном музее Грузии я реализовал проект «По следам утерянных технологий – перегородчатая эмаль», в рамках которого планировалось исследовать своеобразие технологий грузинско-византийской перегородчатой эмали. В процессе работы над проектом мне удалось идентифицировать артефакт, относящийся к середине I тыс. до н.э. из Ванского городища – сделанное из листового железа конусообразное изделие с множеством отверстий. Это приспособление состоит из двух, сделанных из чеканного железа, частей. Как и муфель, описанный П. Теофилом, он имеет нижнюю вогнутую часть и плотно прикрываемую крышку конической формы с металлическим кольцом наверху.

После изучения и реконструкции так называемой крышки Теофила, легче стало идентифицировать крышку из Вани. Это, безусловно, муфель. Как только мы поместим это приспособление в огонь, внутри камеры образуется высокая температура, и, как показали опыты, это дает нам возможность глазурировать мелкие керамические изделия, выжечь покрытую эмалью пластину, а также соединить (припаять друг к другу) тончайшие детали из золота и серебра. Реконструкция описанного предмета и многие эксперименты показали, что он соответствует требованиям для всех перечисленных выше ювелирных операций.

Из этого был сделан вывод, что П. Теофилус, создавая свой трактат, знал и использовал традиционные знания ювелирной мастерской древнего мира. Мы назвали артефакт из Вани «Колхидским колпаком» [6].

Естественно, возникает вопрос, что такое устройство должно было быть известно в более ранние времена, и как в строении колхидского колпака просматривается полноценность и мудрость знаний древних мастеров.

В течение долгих лет работы в этой области мое внимание привлекали хранящиеся в Национальном музее два предмета из огнеупорной глины, покрытые отверстиями. Один из этих двух артефактов был обнаружен при археологических раскопках в Карт-

лийском районе, близ деревни Урбниси на горе Твлепия [7], второй же в ЮгоВосточной Грузии в районе Дедоплискар и относится к IV–III тыс. до н. э. Одна из этих двух крышек, найденной в деревне Урбниси, имеет нижнюю часть, которая идеально сочетается с указанной глиняной крышкой и была найдена археологами в 1956 г.

В 2018 г. в Национальном музее Грузии мы осуществили научный проект под названием «Мудрость, воплощенная в золоте – золотой кубок из Триалети». В рамках проекта я должен был изучить технологию создания исторического памятника культуры – украшенного аппликациями и различными декорами золотого кубка, который был найден в Юго-Восточной Грузии на Триалетском хребте, известном центре курганный культуры, в 1930-е годы и относится к началу II тыс. до н.э.

Технологически этот кубок является предметом сложнейшего строения. Нет такого вида ювелирного искусства, применяемого даже в более поздние эпохи, которого не было бы использовано в этом кубке. Он украшен сердоликом, лазурью, агатом, янтарем, тонко обработанными минералами. А в прекраснейшее, украшенное филигранью и зернью изделие, впаяны перегородчатые формы, заполненные цветной ювелирной пастой. Установлено, что этот кубок изготовлен местными ювелирными мастерами и представляет собой образец тончайшего искусства, не имеющего аналога [8].



Артефакт «Золотой кубок из Триалети»



Копия муфеля «Колхидский колпак»



Нерасплавленные фрагменты субстанции припоя на артефакте «Золотой кубок из Триалети»

В ходе расследования, в первую очередь меня интересовало, сколько способов пайки использовал мастер при создании этого кубка. При наблюдении под микроскопом стало ясно, что золотые листовые пластины были припаяны легированным или субстанционным методом. Это подтверждается тем, что в некоторых местах сохранились нерасплавленные прямоугольные фрагменты припоя.

Это указывает на то, что легированным способом приготовленные некоторые припойные пластины не расплавились во время первого нагревания, а мастер остерегся нагреть изделие во второй раз. Как раз из-за того, что в некоторых местах детали изделия не были основательно припаяны, во время многовекового захоронения кубок деформировался и в результате были частично оторваны аппликации с его корпуса.

При детальном рассмотрении выявляется, что мастер применил и другой тип припоя. В частности, аппликации на самом кубке, филигрань на ножке, оправы для камней и зернь явно припаяны тем методом, которым пользовались в последующие века для соединения перегородок, филигрانی, зерни. Методом, о котором рассказал нам П. Теофилус, а позже и Челлини. При применении этого припоя на поверхности изделия выявляются следы легкой эрозии.

Этот вид припоя действует на поверхности металла, не проникая внутрь [5]. Указанным методом пайки драгоценных металлов для соединения шариков зерни, золотых перегородок и тончайшей филигрانی, пользовались народы древнейших цивилизаций. Для соединения же более крупных деталей, как показали наблюдения, применяли легированный или субстанционный припой. Это еще раз подтвердилось при детальном изучении химического состава триалетского кубка, с помощью портативного неструктурного рентгенофлуоресцентного анализатора XRF. Были изучены четыре интересные нас части кубка. Вот итоги этого исследования:

Край.....	Au – 83,4; Ag – 11,9; Cu – 3,6; Fe – 0,291;
Средняя наружная	
часть кубка.....	Au – 83,1; Ag – 12,9; Cu – 3,59; Fe – 0,348;
Филигрань.....	Au – 82,8; Ag – 11,7; Cu – 4,55; Fe – 0,283;
Ножка кубка.....	Au – 80,1; Ag – 15,7; Cu – 3,31.



Следы реакционного припоя на артефакте «Золотой кубок из Триалети»

Данные научные наблюдения подтверждают многолетние изыскания в этой области. В частности, на местах соединения отмечается избыток легированного металла, в отличие от основной части. Там, где находится филигрань, наблюдается небольшое увеличение содержания меди. Это правильно, так как при применении припоя реакционного типа действует принцип восстановления меди из оксидного состояния до состояния металла. Это вызывает создание тончайшей медной пленки на поверхности золота, которая под воздействием высокой температуры прочно соединяется с золотом и создает слой, имеющий низкую температуру плавления. Это явление происходит молниеносно и очень бережно соединяет маленькие детали друг с другом.

Проведенные химические анализы по составу кубка показывают повышение содержания серебра в местах, где должен был быть применен субстанционный припой. Мы можем смело утверждать, что этот припой изготовлен из золота с добавлением серебра и меди, где серебро преобладает.

Я думаю, что полученные итоги по изучению кубка из Триалети имеют большое значение в области технологий изучения артефактов и пайки.

Все вышесказанное подтверждается рецептами припоя и методами их применения, описанными П. Теофилусом и Б. Челлини. Оба автора подчеркивают, что для надежного соединения больших деталей мастер обязательно должен использовать металлическую или субстанционную пайку, авторы трактатов применяют ее в распиленном состоянии [4].

Обнаруженные на золотом триалетском кубке фрагменты нерасплавленного припоя, а также эрозия вокруг инкрустированной и покрытой зернью части золота, проясняют, что в данном регионе уже в начале II тысячелетия до н. э. известны оба типа припоя и методы их применения.

Проводя исследования с триалетским кубком, я задавался вопросом: какими же инструментами пользовался создатель этого шедевра. Так как в ювелирном деле большое значение придается соединению деталей, в процессе проекта мы реконструировали древние орудия труда и инструменты, применяемые при этом. Как подтвердилось во время эксперимента с «колхидским колпаком», он оказался ювелирным приспособлением для выжигания изделий. Такие же испытания мы провели с муфелем из Квацхели, который целиком сделан из глины и очень похож на «колхидский колпак». Мы задались вопросом, не мог ли древний мастер с помощью этого приспособления производить операции, требующие высокой и стабильной температуры.

По своему строению муфель из Квацхели представляет собой две части, нижняя — камера для огня



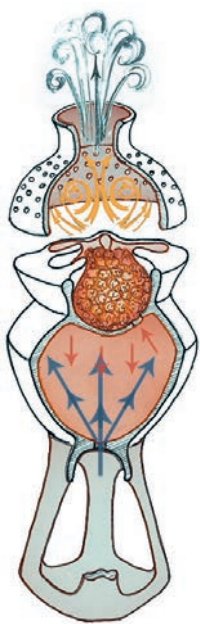
Керамический муфель из
Квацхели

и верхняя, прилегающая к ней, крышка — отражающая тепло. В свою очередь нижняя, предназначенная для огня часть, своим краем плотно прилегает к полый сфере, эта же сфера стоит на трех ножках, соединенных общим дном. У этой сферообразной чаши снизу имеется отверстие для воздуха, который подается в камеру. Внутри камеры для горения образуется очень высокая температура, греющая воздух в нижней части. Из-за сильного огня дно камеры раскалено и греет воздух в сфере. Струя горячего воздуха смешивается с холодным воздухом, входящим из нижней сферы и теплым подается в камеру с горящими углями. Известно, что с помощью теплого воздуха топливо нагревается в два раза быстрее и экономнее горит, стабильно аккумулирует тепло под отражающей крышкой. Это создает отличные условия для работы.

Мы создали из глины муфельную печь наподобие квацхельской и провели с ее помощью множество экспериментов.

В камере для огня под отражающей крышкой создается и поддерживается тепло, более стабильная и однородная температура, чем в современных горелках для пайки, которые не позволяют создать возрастающий в силе огонь, необходимый для спаивания деталей. В муфеле же, созданном на примере квацхельского артефакта, изготавливаемый предмет согревается легко, и самое главное, одинаково по всей поверхности. Это же является предпосылкой качественной удачной пайки.

С помощью теоретических исследований и многочисленных практических экспериментов мы доказали, что при помощи муфеля типа квацхельского можно проводить множество ювелирных операций, таких как: расплавление золота или серебра в маленьких тиглях, обжиг чеканных деталей и их соединение с помощью пайки. Этот муфель представляет собой лабораторное приспособление



Принципиальная схема
работы «керамического
муфеля из Квацхели»

сложной конструкции, которым пользовались в своих мастерских древнейшие мастера — ювелиры еще в конце IV и начале III тыс. до н.э.

Приспособления подобного типа встречаются нами и в более поздние века. Так, ярким примером этого является найденный при раскопках в Ванском городище (Западная Грузия) железный муфель с окошечками, прозванный нами «колхидский колпак». А еще позже П. Теофилус рассказывает в своем трактате о крышке для выжигания эмали.

Таким образом, тщательно изученные нами виды пайки на «триалетском кубке» и эксперименты, проведенные с квацхельским муфелем, дают основание утверждать, что почти на всей территории современной Грузии творили мастера высочайшего класса, которые в совершенстве владели технологией обработки цветных и драгоценных металлов. Артефакт же, относящийся к началу II тыс. до н.э., найденный археологами на Триалетском хребте, говорит о том, что здесь существовала целая система ювелирных мастерских, основанных на глубоких знаниях. Этот наш артефакт — золотой кубок из Триалети — достойное тому подтверждение.

Исследования проходили в рамках научного гранта «Фонда Руставели» — PHDF18449.

Список литературы

1. Бреполь Э. (1982) *Теория и практика ювелирного дела*. — Ленинград, Машиностроение.
2. Хаушка Рудольф. (2004) *Учение о субстанции*. — Калуга, Духовное познание.
3. Theophilus. (1979) *On Divers Arts*. New York: Djver Publications Inc.
4. Вахтанг VI (Багратиони). (1981) *Книга о приготовлении растворов и химических превращениях*. — Тбилиси, Изд-во Тбилисского университета (оригинал на грузинском).
5. Челлини Бе. (2003) *Жизнеописание. Трактаты. Поэзия*. Санкт-Петербург, Азбука.
6. Magradze Ermine. (2014) Manifesting of the Early Antigue Goldsmith Workshop in Site of Ancient Vani on the Example of Colchian Cover. *Bulletin of the Georgian National Museum. Series of Social Science*. Tbilisi, 50B, 323-340.
7. Джавахишвили Ал., Глonti Л. (1962) *Археологические раскопки, проведенные в 1954–1961 гг. на селце Квацхелеби (Твепиа-кохи)*. Урбниси. Тбилиси, Изд-во Академии наук Грузинской ССР (оригинал на грузинском).
8. Куфтин Б.А. (1941) *Археологические раскопки в Триалети*. Там же.

References

1. Brepol, E. (1982) *Theory and practice of jewelry making*. Leningrad, Machinostroenie [in Russian].
2. Khaushka, R. (2004) *Theory about substance*. Kaluga, Dukhovnoe Poznanie [in Russian].
3. Theophilus. (1979) *On Divers Arts*. New York: Djver Publications Inc.
4. Vahtang V.I. (Bagrationi) (1981) *Book on preparation of solutions and chemical transformations*. Tbilisi, Izd-vo Tb. Un-ta [in Georgian].
5. Chellini Be (2003) *Biography. Treatises. Poetry*. St.-Petersburg, Azbuka [in Russian].
6. Magradze, E. (2014) Manifesting of the early antigue goldsmith workshop in site of ancient Vani on the example

- of Colchian Cover. *Bull. of the Georgian National Museum. Series of Social Sci.* Tbilisi, 50B, 323-340.
7. Dzhavakhishvili, Al., Glonti, L. (1962) *Archeological excavations performed during 1954-1961 in Kvatskhelebi village (Tvlepia-Kokhu).* Urbnisi, Tbilisi. Academy of Sci. of Georgian SSR [in Georgian].
8. Kuftin, B.A. (1941) *Archeological excavations in Trialeti.* Ibid.

ABOUT THE OLDEST TECHNOLOGY OF BRAZING ON THE EXAMPLE OF ARCHAEOLOGICAL FINDINGS – A GOLDEN CUP FROM TRIALETI AND MUFEL FROM KVATSKHELI

Er. Magradze

National Museum, 3 Furtseladze Str., 0105, Tbilisi, Georgia. E-mail: e.magradze@gmail.com

Considering the stages of human development from a material and spiritual point of view, a significant achievement in this field is the discovery and study of metals, as well as the invention of methods for their processing. The result of activity and constant search in this direction is the creation and development of metallurgy. Masterpieces of jewellery are presented to us as a continuation of these processes. An integral part of these processes is the accumulation of knowledge through observation and improvement of the learned rules and techniques. One of the most important of them is the brazing process as a method of joining finished metal parts that was invented by a human at an early stage of human development. 8 Ref., 8 Fig.

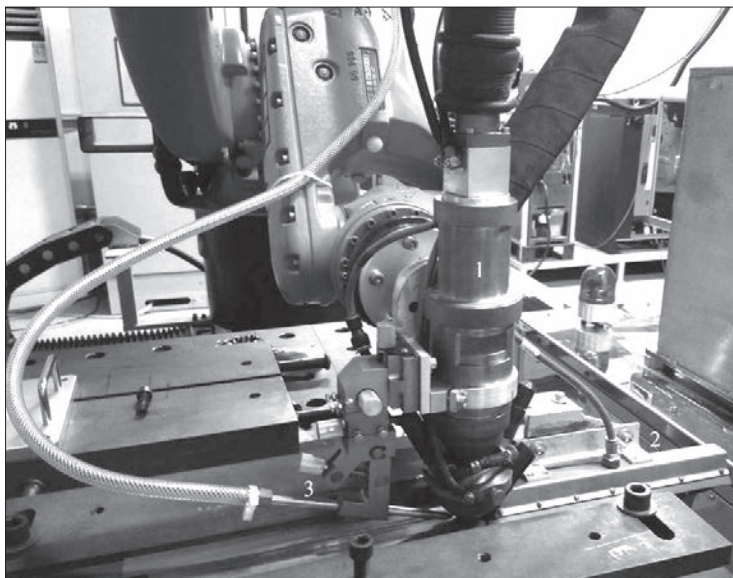
Keywords: brazing, reaction and substance brazing alloy, metallic gold, brazing of artifacts

Поступила в редакцію
28.01.2020

Розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона

ГІБРИДНЕ ЛАЗЕРНО-МІКРОПЛАЗМОВЕ ЗВАРЮВАННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ

Зварні вироби з тонколистових нержавіючих сталей виготовляють сучасною промисловістю з метою застосування в областях техніки, пов'язаних з необхідністю експлуатації досить міцних конструкцій, схильних до корозії та певним механічним впливам. Прикладами таких областей техніки можуть бути: виготовлення конструкцій побутового призначення для умов морського клімату або підвищеної вологості, елементів корпусних конструкцій транспортної техніки (наприклад, корпусів залізничних вагонів), сильфонних компенсаторів для атомної енергетики, обладнання хімічної і харчової промисловості (наприклад, баків, фільтрів) та інше. При цьому часто ставиться завдання зварювання нержавіючих сталей товщиною до 3,0 мм встик. Одним із сучасних інноваційних способів зварювання, що дозволяє мінімізувати залишкові деформації, отримувати високоякісні та довговічні з'єднання, є гібридне лазерно-мікроплазмове зварювання. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона відпрацьовані базові технологічні прийоми гібридного лазерно-мікроплазмowego зварювання тонколистових нержавіючих сталей та проведено вибір параметрів режимів, а також досліджені механічні та корозійні властивості отриманих з'єднань. Проводили гібридне лазерно-мікроплазмове зварювання тонколистових нержавіючих сталей без присадного дроту та з його застосуванням. Визначили, що застосування присадного дроту доцільно починаючи з товщини не менше 1,0 мм. При цьому для повного розплавлення дроту діаметром 0,8 мм в разі зварювання з щільно зістикованими крайками погонну енергію процесу необхідно збільшити на 20–40%, а в разі зварювання з зазором між крайками на 15–30%. Величина зазору повинна складати близько 15–20% від товщини кромок. Визначення механічних та антикорозійних властивостей отриманих гібридним лазерно-мікроплазмовим зварюванням з'єднань з нержавіючих сталей підтвердило перспективність промислового застосування цього способу.



Зовнішній вигляд головки для лазерно-мікроплазмowego зварювання в руці робота KUKA KR30HA: 1 – інтегрований плазмотрон; 2 – система захисту шва; 3 – мундштук для подачі присадного дроту

ПОЛЬСКОМУ ИНСТИТУТУ СВАРКИ 75 ЛЕТ!

Польский Институт сварки был основан 28 марта 1945 г. Его возглавили директор Болеслав Шупп и заместитель Юзеф Пилярчик, который в декабре 1959 г. принял на себя обязанности директора. В первые послевоенные годы Институт занимался обучением сварщиков. В последующие годы Институт проводилась научно-исследовательская деятельность в области технологий дуговой и контактной сварки, сварочных материалов, сварных конструкций, свариваемости, систем управления и источников сварочного тока. Изготавливали опытные образцы и небольшие серии сварочных аппаратов, партии новых сварочных материалов для сварки, наплавки и пайки, а также посты для механизированной сварки. Новинки внедрялись в производство на промышленных предприятиях.

В рамках трансформации в 1990-х годах была упрощена организационная структура, проведен интенсивный поиск новых задач в области сварки, особенно тех, которые экономически оправданы. Уже почти 30 лет Институт работает в свободном и конкурентном рынке, в условиях самофинансирования.

С 1 апреля 2019 г., в рамках проводимой в Польше реформы, связанной с достижением целей стратегии Европа 2020, Институт сварки вошел в Исследовательскую сеть ЛУКАСЕВИЧ, вместе с другими 35 научно-исследовательскими институтами (почти 8 тыс. сотрудников).

Организационная структура Института сварки включает пять научно-исследовательских отделов: отдел свариваемости и сварных конструкций, отдел неразрушающего контроля, отдел технологии контактной сварки, склеивания и инженерии окружающей среды, отдел сварочных технологий, отдел электронного сварочного оборудования и три центра: Центр по сварочной подготовке и надзору, Центр сертификации, Центр маркетинга и научной информации.

В Институте сварки работают 148 сотрудников, в том числе 7 профессоров и 19 кандидатов технических наук.

Основными направлениями деятельности исследовательских отделов института является проведение исследовательских и опытно-конструкторских работ и их внедрение в различных областях сварочного производства.

Отдел свариваемости и сварных конструкций проводит испытания новых конструкционных материалов и занимается вопросами проектирования сварных конструкций. Завершен международный проект по проектированию спиральношовных сварных труб для применения при строительстве трубопроводов. Проводятся работы по сварочным

остаточным напряжениям, разработана технология и оборудование для вибрационной стабилизации размеров конструкции после сварки с частотой до 700 Гц. Отделом проводятся работы по инженерии поверхности, в том числе разрабатывается технология нанесения поверхностных слоев, содержащих соединения рения, с использованием электронно-лучевого процесса, и технология электронно-лучевой сварки разнородных материалов. Важной областью деятельности отдела является экспертиза по определению причин отказов сварных конструкций – сосудов, мостов, трубопроводов и т.д., а также по определению свариваемости неизвестных материалов при ремонте старых конструкций мостов и гидротехнических сооружений.

Созданный недавно отдел неразрушающего контроля реализует проект по методологии и оценке достоверности контроля сварных соединений, исследований тонкостенных труб для энергетики с использованием фазированной решетки Phased Array, проводит исследования по ультразвуковому контролю сварных соединений из аустенитной стали и соединений разнородных сталей. Выполняет сравнительные испытания методов TOFD, Phased Array и цифровой радиографии сварных соединений, а также ряд экспертных работ. Полученные знания сотрудники отдела широко используют на курсах неразрушающего контроля, проводимых по методам VT, PT, MT, UT, RT на всех трех уровнях квалификации. Отдел является национальным лидером в области обучения неразрушающему контролю – ежегодно обучается около 2000 студентов, что составляет более 55 % рынка обучения в Польше.

Отдел технологии контактной сварки, склеивания и инженерии окружающей среды проводит работы в трех направлениях. Первое направление предусматривает разработку и внедрение технологий сварки трением и контактной сварки, в том числе сварки трением с перемешиванием FSW (Friction Stir Welding) и ультразвуковой сварки меди и алюминия. В рамках международных и европейских проектов разработана технология сварки трением с перемешиванием и был получен первый патент в области сварки FSW, касающийся соединения листов и плит с существенно различными физическими свойствами. Другие проекты в области метода FSW касались сварки титановых сплавов Ti64 и CP-Ti, предназначенных для хирургических инструментов и имплантатов, а также разработки и внедрения технологии кольцевой сварки методом FSW пневматических цилиндров. В последнее время в Институте разработаны технологии соединения методом FSW армирующих вставок с алюминиевыми корпусами автомобиль-

ных двигателей. Результатом этого проекта стала заявка, совместно с автомобильной компанией, международного патента по производству блоков двигателя с использованием метода FSW. Инновационные проекты, реализуемые отделом, посвящены также применению метода высокоскоростной сварки трением HSFW (сварка со скоростью до 24000 об/мин) для соединения элементов из стали и сплавов алюминия. По второму направлению проводятся исследовательские работы и обучение в области сварки и контактной сварки термопластов, а также курсы склеивания на основе требований EWF в сотрудничестве с Институтом Фраунгофера IFAM в Бремене. В рамках третьего направления выполняются проекты по исследованию вредных для здоровья химических веществ и пыли при сварке, пайке, пайкосварке и термической резке металлов; по выбросам загрязнений окружающей среды в процессах сварки MIG/MAG с применением новых присадочных материалов, а также исследование выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу при контактной сварке листов, покрытых современными антикоррозийными покрытиями. Последний инновационный проект касается разработки методики исследования эмиссии при лазерной сварке.

В отделе сварочных технологий в последнее время были выполнены исследовательские проекты: по твердой пайке нержавеющей стали с титаном, гибридной сварке лазер + MIG/MAG конструкционных сталей и алюминиевых сплавов, лазерной пайкосварке YAG и лазерной сварке с присадочным материалом в виде проволоки. Разработано и внедрено технологию роботизированной сварки Т-образных соединений деталей авиационных двигателей, разработано технологию лазерной сварки оребренных котельных труб из аустенитной стали и никелевых сплавов, предназначенных для работы в котлах со сверхкритическими параметрами, технологию сварки броневой стали, низкоэнергетические технологии сварки MIG/MAG с управлением переносом капли за счет изменения формы сварочного тока, технологию роботизированной гибридной сварки деталей кар-

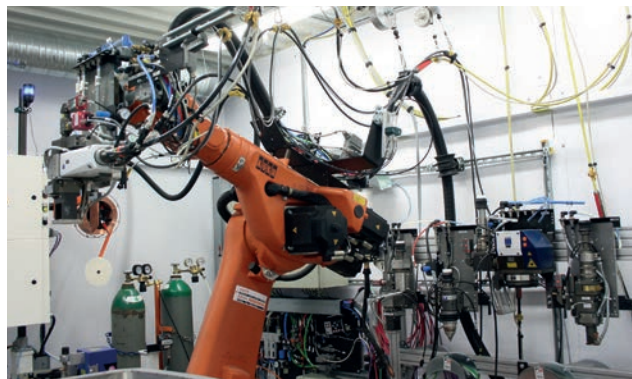
каса шасси и стрел кранов из термоупрочненной стали с высоким пределом текучести и технологию лазерной наплавки градиентных слоев. Отдел также активно участвует в процессе подготовки польской промышленности к строительству первой в стране атомной электростанции, в том числе разрабатывая для отечественных компаний, по запросу правительства, рекомендации по требованиям правил ASME, AFCEN и систем обеспечения качества, а также рекомендации по обучению сварочного персонала и неразрушающего контроля.

В последние годы ведущим продуктом отдела электронного сварочного оборудования, широко внедряемого в промышленности, являются устройства, разработанные для индукционного нагрева мощностью до 100 кВт и рабочей частотой до 400 кГц. Они используются в процессах термообработки: в металлургии и электромеханической промышленности, в плавке металлов, обработке поверхности, при нагреве и соединении металлов. Этим отделом также разрабатываются системы регистрации параметров дуговой и контактной сварки, в том числе разработано и внедрено систему регистрации технологических условий роботизированной сварки Т-образных соединений деталей авиационных двигателей.

Основной деятельностью Центра по сварочной подготовке и надзору Института сварки является непрерывное обучение персонала для сварочного производства. В Центре проводится подготовка сварочного персонала на всех уровнях в соответствии с программами MIS и EWF: I/EWE, I/EWT, I/EWS, I/EWP и I/EWIP (таблица).

Институтом сварки выдано также около 2000 сертификатов персонала по неразрушающему контролю, в соответствии с EN ISO 9712 и на основе аккредитации Польского центра аккредитации PCA.

Другие формы деятельности Центра в области обучения и подготовки кадров – это обслуживание и контроль польской системы подготовки сварщиков в локальных обучающих центрах на территории всей страны, курсы по неразрушающему контролю (VT, PT, UT, RT, MT) и специальные курсы (орбитальная сварка труб, сварка арматурной стали и т.д.).



Лабораторный комплекс роботизированной лазерной сварки, укомплектованный лазером YAG мощностью 12 кВт, TruDisk 12002 TRUMPF



Сварка трением с перемешиванием радиатора из медного сплава



Количество документов, выданных Институтом сварки в период 2004–2019 гг.

Количество международных дипломов, выданных Центром сертификации Института сварки до 18.03.2020 г.

Количество дипломов	IWE	IWT	IWP	IWS	IW	IWI
	2986	384	233	881	31	889

С целью помощи локальным обучающим центрам и одновременно обеспечения соответствующего уровня подготовки сварщиков в Польше, Институт сварки проводит:

- предметный надзор над подготовкой сварщиков во всей стране;
- аттестацию польских центров по подготовке сварщиков (в Польше 308 таких центров);
- проверку экзаменаторов, проводящих экзамены, на основании полномочий (лицензии), выданных Институтом сварки (в Польше имеется 219 таких экзаменаторов);
- выдача сварщикам свидетельств квалификационного экзамена сварщика по PN-EN ISO 9606 и документов «Книга сварщика» на основании экзаменационных протоколов, присылаемых в Институт сварки.



В отделе электронно-лучевой сварки

В сферу деятельности института также входит аттестация процедур сварки, аттестация заводов, производящих сварные конструкции, экспертиза и сертификация сварных конструкций, экспертиза и сертификация продукции, предназначенной для сварочного производства, а также разработка инструкций и руководств. Благодаря этому сегодня Институт предлагает практически все, что нужно современной промышленности в области сварки.

Проф. Ян Пилярчик, директор Института в 1990–2015 гг., характеризует деятельность Института в области обучения таким образом: «Институт сварки в Гливицах является в Польше самым большим и очень важным научно-исследовательским центром, который проводит работы по исследованию, развитию и внедрению во всех областях и направлениях сварочного производства, что очень помогает в процессе обучения и подготовки кадров. Научные сотрудники Института, которые десятки лет работают во многих областях сварочного производства, совмещают в рамках своих специальностей глубокие теоретические знания с огромным лабораторным опытом и ценными результатами практического сотрудничества с промышленными предприятиями, благодаря этому всецело удовлетворяют требованиям, выдвигаемым к преподавателям наивысшего уровня».

По материалам пресс-релиза
Института сварки Польши

ЗБОРИ, ПРИСВЯЧЕНІ 150-річчю ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ Є.О. ПАТОНА

5 березня 2020 р. у конференц-залі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відбулися Загальні збори НАН України, присвячені 150-річчю від дня народження всесвітньо відомого вченого в галузі мостобудування та зварювання академіка НАН України Євгена Оскаровича Патона. У зборах прийняли участь співробітники ІЕЗ, академічних інститутів, КПП ім. Ігоря Сікорського та представники підприємств зварювальної індустрії України. А також у зборах прийняв участь академік Борис Євгенович Патон, якого присутні привітали тривалими оплесками.

З привітанням до учасників Загальних зборів звернувся віце-президент Національної академії наук України академік **А.Г. Наумовець**. Він наголосив, що академік Євген Оскарович Патон, знаний і авторитетний фахівець з мостобудування та електрозварювання, фундатор і керівник першого в світі наукового інституту електрозварювання, засновник і керівник кафедр мостів та електрозварювання Київського політехнічного інституту все своє життя присвятив інженерній, науковій та організаційній діяльності, підготовці молодих вчених і фахівців у галузі мостобудування та електрозварювання.

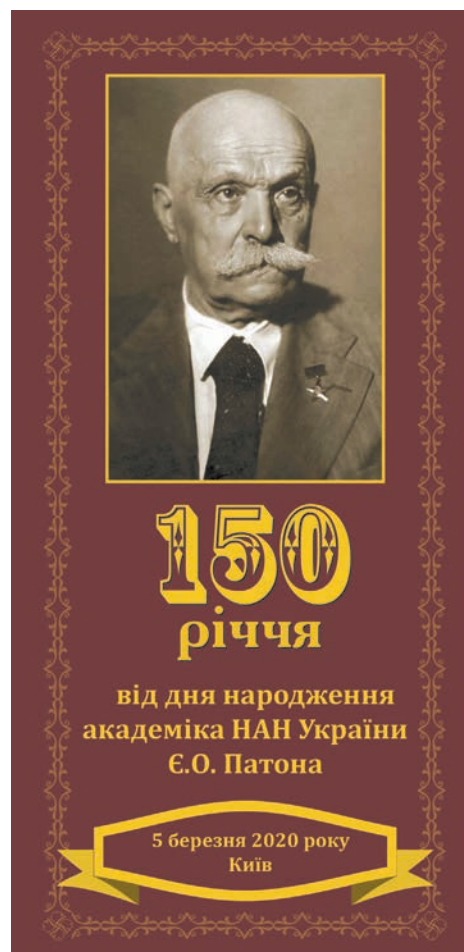
Наприкінці 1920-х років Євген Оскарович Патон прийшов до твердого переконання, що технічний прогрес у виробництві металевих конструкцій в значній мірі буде визначатися використанням зварювання на заміну іншим способом нероз'ємного з'єднання деталей.

Євген Оскарович взяв за мету створити технологію електрозварювання та науково довести її перевагу. Вирішенню цієї задачі Євген Оскарович Патон присвятив другу половину своєї творчої діяльності.

У найкоротші терміни Євгеном Оскаровичем у створеному ним у 1934 р. Інституті електрозварювання були вирішені складні наукові проблеми: вивчено особливості роботи зварних конструкцій у стані напруження, що виникає в них у процесі виготовлення, розроблено методи розрахунку на міцність, створено раціональні технологічні конструкції.

Ці перші дослідження разом із багатьма наступними стали теоретичною основою науки про зварювання, перетворили її на потужне знаряддя технічного прогресу, привели до революційних зрушень у багатьох галузях виробництва – нафтохімічній, гірничо-видобувній, металургійній промисловості, та інших галузях.

На початку 1940 р. Євген Оскарович і його співробітники розробили новий спосіб зварювання ме-



талів – автоматичне дугове електрозварювання під флюсом. Це відкриття дозволило перейти від ручного зварювання до індустріального, механізованого високоякісного виробництва зварних конструкцій.

Плідна робота Євгена Оскаровича Патона у роки війни була особливо відзначена танкобудівниками. У важких умовах воєнного часу Є.О. Патон і його співробітниками були створені технологія та обладнання для зварювання броньованих корпусів танків, артилерійських снарядів, боєприпасів. Вперше у світі був налагоджений масовий випуск танків з корпусами, звареними автоматами.

Надалі наполеглива робота Євгена Оскаровича Патона перетворила створений ним метод автоматичного зварювання під флюсом у потужне знаряддя технічного прогресу. Широке впровадження автоматичного зварювання дозволило перейти до застосування у багатьох галузях виробництва високопродуктивних механізованих поточних ліній.

Наукові труди Євгена Оскаровича Патона заклали тверду основу для масового впровадження автоматичного зварювання у виробництво мостів, про що красномовно свідчить перший найбільший

у світі цільнозварний шосейний міст імені Євгена Оskarовича Патона, збудований у Києві у 1953 р.

Євген Оскарівч створив в Інституті електрозварювання злагоджений колектив, він став фундатором славнозвісної Патонівської школи, яка здобула величезний авторитет і широке визнання в світі.

За всіма здобутками Євгена Оскарівча Патона бачиться глибока переконаність у непересічному значенні науки в житті суспільства, його захопленість головною справою життя – наукою, цілеспрямованість і наполегливість у досягненні поставленої мети, унікальна працездатність і організованість. Його праця у науці – це як міст через все життя.

У своїй доповіді «Патони і Київський політехнічний інститут» ректор НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» академік **М.З. Згуровський** висвітлює «чи найславетнішу сторінку історії Київського політехнічного інституту», яка розпочалася у 1905 р., коли директор Київського політехнічного інституту імператора Олександра II К.О. Зворикін запросив молодого професора Імператорського Московського інженерного училища шляхів сполучень Євгена Оскарівча Патона працювати у КІІ.

На той час Євген Оскарівч вже був відомим вченим мостобудівником, автором знаменитого двотомника «Залізні мости», мав чин колезького радника, був удостоєний ордена Анни 3-го ступеня «в нагороду подвигів, совершаемых на поприще госслужбы».

Рішення переїхати в Київ стало доленосним як для родини Патонів, так і для української промисловості, науки і освіти. Талант Євгена Оскарівча поєднувати якості організатора, вченого та викладача відіграв визначальну роль в подальшій долі КІІ. Його система підготовки інженерів нового типу, яка ґрунтувалася на тріаді «Наука – Виробництво – Кадри», вивела КІІ на рівень провідних вищих навчальних закладів у Російській Імперії.

На початку роботи у КІІ Євгена Оскарівча вразила так звана умоглядність викладання, коли студентам все пояснювалося на словах, без предметної демонстрації. І тому, коли в жовтні 1906 р. Євгена Оскарівча обрали деканом інженерного відділення, він доклав багато зусиль для відкриття нових лабораторій, обладнання навчальних кабінетів наочними посібниками, запрошення відомих професорів і вчених. І вже в наступному 1907 р. на інженерному відділенні було 6 спеціалізацій: архітектура, гідротехніка, залізниця, мости, санітарна техніка, земсько-міська справа.

Окремою великою заслугою Євгена Оскарівча Патона було створення і подальший розвиток Інженерного музею КІІ, прообразу нинішнього державного політехнічного музею України. Інженерним музеєм він керував впродовж семи років – з 1905 по 1912. Саме Євген Оскарівч розробив

каталог експонатів, що стали надбанням музею. На той час їх було 1200. З його ініціативи музей був органічно інтегрований в навчальний процес. Під час лекцій викладачі користувалися моделями та зразками для наочного пояснення студентам складних з'єднань, зарубок, вузлів та різних конструктивних частин.

Для наочної демонстрації мостобудування в Інженерному музеї була розміщена унікальна експозиція дерев'яних мостів, виконаних у масштабі від 0,5 до 0,75 натуральної величини. Експозиція була настільки цікавою та корисною, що Московський інститут інженерів шляхів сполучень замовив комплект таких моделей, які були виготовлені для нього в механічних майстернях КІІ.

Інженерний музей став основою для створення нових навчально-допоміжних підрозділів КІІ: мостової дослідної станції, кабінету моделей та відділення архітектури при музеї.

Також з ініціативи Євгена Оскарівча Патона у КІІ було відкрито кабінет мостів – для напрацювання нових інженерних рішень і виконання проєктів по них. У 1930 р. кабінет мостів, якому Євген Оскарівч присвятив 26 років, був переданий до Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту під час його виділення з КІІ.

У 1906-1907 рр. Євген Оскарівч Патон видає третій і четвертий томи курсу «Залізні мости», у 1910 р. – «Дерев'яні мости». Одночасно Євген Оскарівч був одним з перших мостовиків у Російській Імперії, хто почав залучати студентів до роботи з проєктування реальних споруд. Найбільш відомими проєктами того часу, на яких Євген Оскарівч виховав із студентів цілу плеяду майбутніх мостобудівників, стали проєкт відомого в Києві пішохідного мосту через Петровську алею, побудованого у 1909-1910 рр., та проєкт Мухранського мосту через річку Куру в Тифлісі, побудованого у 1911 р.

14 квітня 1913 р. Євген Оскарівч Патон був нагороджений Імператорським орденом Святого Рівноапостольного князя Володимира 4-го ступеня.

В роки Першої світової війни Євген Оскарівч організував роботи з забезпечення армії засобами подолання водних перешкод, зокрема, він вирішив проблему швидкої заміни знищених мостів. Маловідомим є той факт, що Євген Оскарівч облаштував в маєтку свого старшого брата Михайла приватний госпіталь, в якому після поранення військовослужбовці проходили безкоштовне лікування. У вільний від навчального процесу час він обходив київські госпіталі, спілкувався з лікарями, складав списки поранених для відправки їх до брата в садибу Нова Ушиця.

Під час революції 1917 р. та громадянської війни навчання у КІІ то припинялося, то відновлю-

валося, кількість студентів і викладачів зменшилась вдвічі, а їх матеріальні умови наблизилися до критичної межі. Для збереження інституту Євген Оскарович організував комітет виживання, який налагодив постачання продуктів із сільської місцевості та надавав допомогу тим, хто її вкрай потребував. Завдяки цьому викладачі та студенти КПП, їхні сім'ї змогли пережити ті страшні незгоди.

Незважаючи на неймовірні складнощі того часу, справу свого життя – зведення мостів – Євген Оскарович не припиняв. У 1920 р. він очолив проектування та будівництво на місці зруйнованого поляками Миколаївського ланцюгового мосту – підвісного балочного мосту імені Євгенії Бош, який був відкритий 10 травня 1925 р.

У вересні 1921 р. з нагоди 25-річчя викладацької діяльності Євгена Патона Рада Механічного факультету КПП організувала мостову дослідну станцію, названу його ім'ям. Станція призначалася для навчально-методичної роботи та давала студентам можливість брати участь у випробовуванні мостів на практиці.

На загал, спільно зі студентами та науковцями КПП, підтверджуючи свій девіз «Наука – Виробництво – Кадри», Євген Оскарович Патон створив понад 35 проектів мостів, більшість з яких були втілені в життя.

У 1928 р. Євген Оскарович різко змінив напрям своєї роботи. Він дійшов висновку, що в проектуванні мостів досягнуто великих успіхів, але процес їх виготовлення надто трудомісткий, і для його спрощення він запропонував використання методу електрозварювання. Ця галузь тільки починала розвиватись на основі ідеї дугового електрозварювання Миколи Бенардоса. Але в баченні Патона вона мала стати принципово міждисциплінарною, ґрунтуючись на фізиці, математиці, механіці, металургії, електротехніці, науці про матеріали. Нова справа стала предметом особливого захоплення Євгена Оскаровича.

У 1929 р. Київський політехнічний інститут висунув свого професора для обрання членом Всеукраїнської академії наук. Першою важливою справою академіка Євгена Патона стало започаткування секції матеріалознавства в системі Академії наук. Очоливши цю секцію, він впродовж декількох років сформував напрям матеріалознавства як стратегічний для української науки.

Завжди зберігаючи вірність мостобудуванню, Євген Оскарович повністю віддав справі становлення наукової школи зварювання. Для нової галузі була необхідною підготовка відповідних інженерних кадрів. Тому у 1935 р., вже як директор Інституту електрозварювання Всеукраїнської академії наук, Євген Патон організував на механічному факультеті КПП кафедру зварювального вироб-

ництва та став її першим завідувачем. Провідні викладачі цієї кафедри, як і він сам, одночасно працювали науковими співробітниками Інституту електрозварювання. Заснована Євгеном Оскаровичем наукова школа «Фізико-хімічні і термодеформаційні основи зварювання та споріднених процесів» і сьогодні є провідною науковою школою кафедри зварювального виробництва КПП.

Наступною справою Євгена Патона було створення у 1948 р. зварювального факультету КПП як унікальної школи підготовки інженерів, що базувалася на загальнонауковому фундаменті математики, механіки, фізики, металургії, матеріалознавства і електротехніки.

За 72 роки зварювальний факультет КПП став справжнім центром підготовки та перепідготовки висококваліфікованих інженерів-зварювальників. З його лав вийшло понад 6500 інженерів, 55 випускників факультету стали докторами наук, 160 – кандидатами наук, 7 – академіками Національної академії наук України.

На шану Євгена Оскаровича Патона у 2002 р. йому був споруджений пам'ятник роботи скульптора Олександра Скоблікова з вибитими на підніжжі словами «З надією я дивлюся на нашу талановиту молодь». Ці слова Євгена Оскаровича виявилися пророчими. Нові покоління київських політехніків вважають за честь вчитися на прикладі життєвого та трудового подвигу Патонів і ставати продовжувачами їх великих справ.



Академік Б.С. Патон біля пам'ятника Є.О. Патону в НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Автор-скульптор О.П. Скобліков, 2002 р.

Повноту образу академіка Є.О. Патона можна скласти, лише розглядаючи його діяльність у комплексі як ученого, інженера-практика, педагога, державного та громадського діяча, наголосив у своїй доповіді «Суспільне значення творчої спадщини академіка Євгена Оскаровича Патона» академік **О.С. Онищенко**.

Наукові відкриття, технічні та технологічні винаходи стають суспільною силою, коли знаходять широке застосування, вносять зміни у виробництво, побут, способи праці. Електрозварювання служить яскравим прикладом цього. Безперервні ініціативи Євгена Оскаровича привели до того, що електрозварювання швидко стало та досі залишається загальноприйнятим робочим процесом на всіх ділянках народного господарства, а професія зварника – масовою та престижною.

Велике суспільне значення мала діяльність Євгена Оскаровича, спрямована на утвердження в науці гідного статусу інженера та інженерної справи. На власному досвіді, зокрема, на прикладі мостобудування та електрозварювання, Є.О. Патон довів, що технічні науки являють собою міждисциплінарні комплекси, де дослідження і впровадження їх результатів зливаються в єдине ціле.

Центральне місце в педагогіці життя академіка займав культ праці. Працю він вважав основою життя. «Праця, – говорив він, – завжди була найголовнішим у моєму житті». Тверде місце в трудовій етиці академіка Є.О. Патона займали оптимізм, упевненість у досягненні науково поставленої мети, долання невіри, сумнівів, розчарувань і категоричне неприйняття поразницьких настроїв. Він справедливо вважав, що наукова думка, помножена на експеримент і волю дослідника, обов'язково знайде вдале рішення нової проблеми.

Інтелектуальний авторитет, талант організатора науки і трудова етика академіка Є.О. Патона породили конкурентні на світовому рівні науково-дослідний інститут, великі наукові школи мостобудівників і електрозварників, когорта видатних учених, інженерів, конструкторів, успішних керівників промислових підприємств і галузей, гігантських новобудов. Як приклад можна назвати Івана Гавриловича Александрова – учня Євгена Оскаровича, який став автором проекту Дніпрогесу, проекту генеральної схеми електрифікації нинішніх країн Центральної Азії, одним з творців Арало-Байкало-Амурської магістралі.

Масштаб особистості академіка Є.О. Патона, ідеї та технології якого революціонізували технічну сферу країни, сам по собі мав суспільне значення. Але Євгену Оскаровичу доводилося і брати безпосередню участь у розв'язанні державних проблем як депутату Верховної Ради СРСР, депутату Київської міської ради, державному раднику та члену машинобудівної ради при РНК СРСР, члену Президії, голові Відділу технічних наук і віце-президенту АН УРСР. А ще на початку трудової діяльності (1905 р.) він був членом Мостової комісії при інженерній раді тодішнього Міністерства шляхів сполучення.

Після закінчення війни Є.О. Патон очолював низку академічних комісій і комітетів, діяльність яких мала широке суспільне значення. Це, насамперед, Комісія по відновленню народного господарства, промисловості та культосвітніх закладів. Є.О. Патон об'єднував зусилля всіх установ АН УРСР для подолання наслідків війни. Головна увага зверталася на допомогу відбудові і розбудові флагманів індустрії в регіонах Великого Дніпра і Великого Донбасу.

Не можна забути і відповідальну діяльність під керівництвом Є.О. Патона Комісії АН УРСР з питань повернення вивезених німецько-фашист-





Президія зборів, зліва направо: Л.М. Лобанов, А.Г. Наумовець, Б.Є. Патон, М.З. Згуровський, О.С. Онищенко, С.І. Кучук-Яценко

ськими окупантами українських цінностей. Євген Оскарович домігся, щоб у Німеччині постійно працювало представництво Академії, на перевалочних базах у Бресті та Ковелі були її постійні уповноважені. Завдяки його прямим виходам на союзних міністрів, АН УРСР отримала право розшукувати у всіх чотирьох зонах окупації Німеччини наше майно, замовляти в порядку репарації наукове обладнання і відправляти все це прямо в Київ. Було повернуто ботанічні гербарії, значну частину бібліотечних, архівних, музейних фондів, лабораторного обладнання.

Академік Є.О. Патон був справжнім дипломатом від науки. Не раз йому доводилося зустрічати спротив консервативних кіл. Але йому вдавалося переконати високопосадовців і керівників промпідприємств у перевагах пропонованих ним технологій. І неодноразово приймалися урядові рішення, спрямовані на впровадження патонівських науково-технічних здобутків. Показовою може бути постанова Ради Міністрів СРСР від 27 березня 1952 р. про заходи щодо впровадження в народне господарство нових способів електрозварювання.

Він послідовно проводив політику керівництва Академії на розширення її науково-технічного сектору як найбільш затребуваного народним господарством. Не тільки в Києві, а й у Харкові, Донецьку, Дніпрі, Львові, Одесі зміцнювалися існуючі та відкривалися нові наукові установи. З їх об'єднання виникли пізніше відомі нам сьогодні регіональні наукові центри, формувалася українська національна наукова система. Це був і шлях становлення АН як головної наукової організації України і одного з провідних міжнародних наукових центрів. У всіх цих трансформаціях Академії Є.О. Патон був реальною рушійною силою.

Громадська діяльність – такий же вагомий складник багатовимірного образу академіка Є.О. Патона як і наукова, педагогічна та державна робота. Він був уключений у різноманітні громадські організації – товариства, спілки, комісії, комітети. Першою знаковою серед них був Ко-

мітет електрозварювання – об'єднання науковців, викладачів, представників промислових і будівельних організацій з метою поширення знань і досвіду в галузі електрозварювання. Він його організував і очолив. Так само з його ініціативи виникло та діяло під його керівництвом у Києві Науково-інженерне товариство працівників зварювальної справи. Він був і членом президії такого ж Всесоюзного товариства.

Республіканська Рада науково-технічної пропаганди та її наступник республіканське Товариство для поширення політичних і наукових знань створювалися та розгортали діяльність за його активної участі.

Академік Є.О. Патон – зіркова постать історії науки. Він утвердив епоху електрозварювання в способах виробництва, наповнив її науковими технологіями та високопродуктивним устаткуванням. Створював прообрази техніки майбутнього – механізми-автомати, які переросли в роботів. Відкрив, що методи з'єднання матеріалів і матеріали для з'єднання невичерпні. Показав, що шлях цивілізації не в постіндустріалізації, а в суперіндустріалізації. На особистому прикладі довів, що творчості всі вікові категорії людей підвладні. Дав переконливі докази, що в критичні часи рятівною силою є наука.

З доповіддю «Життєвий та творчий шлях видатного вченого Є.О. Патона» виступив академік-секретар Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства академік НАН України **Л.М. Лобанов**.

Спогадами про особисті зустрічі з Є.О. Патонем та стиль його роботи та керівництва поділився перший заступник директора ІЕЗ академік **С.І. Кучук-Яценко**.

По закінченню зборів до присутніх звернувся **Борис Євгенович Патон**. Він подякував за участь у зборах з нагоди дня народження його батька – академіка Євгена Оскаровича Патона. Борис Євгенович побажав усім здоров'я, успіхів та наголосив, що чесне служіння науці це величезна радість, величезна, часом виснажлива, праця, праця на все життя!

О.К. Маковецька, О.Т. Зельніченко

По закордонним журналам

Реферати статей з журналу
«Welding in the World», №2, 2020 р.*

Ультразвукове з'єднання керамікою, міддю та алюмінієвим сплавом з використанням припою типу Sn–Zn–Sb. *Yongchao Wu, Hong Li, Wenqing Qu, Jie Zhang, Hongshou Zhuang*, pp. 247–256.

Керамічно-металеві композитні компоненти, виготовлені технологією пайки, мають широке застосування в промисловості завдяки своїм чудовим властивостям. Було досліджено паяння кераміки (Al_2O_3) з керамікою, міддю та алюмінієвим сплавом 5056 відповідно, використовуючи припой нового типу Sn–Zn–Sb при температурі 250 °C на повітрі за допомогою ультразвуку. Проаналізовано мікроструктуру припоїв Sn–9Zn–xSb з різним вмістом Sb. Вивчено вплив вмісту Sb на міцність з'єднання «кераміка–кераміка». Вивчали мікроструктуру межі інтерфейсів припою кераміки та механізм з'єднання. Значно нова інтерметалічна фаза (Zn_4Sb_3) виявлена в мікроструктурі припою, а вміст фаз Zn_4Sb_3 та β -Sn збільшується зі змістом елемента Sb. Під час процесу пайки припоєм (Sn–Zn–Sb) складався з рідкого сплаву Sn–Zn і твердої металевої фази ZnSb, а вирішальним фактором у досягненні надійних паяльних зв'язків кераміки було визнано квазіплавлення припою. На межі кераміки/припою не було реакційного шару, і пайка заповнювала канавки на керамічній поверхні для утворення міцного механічного з'єднання, що призводить до підвищення міцності. На межі кераміка/пайка траплялися переломи, і частинки Zn_4Sb_3 були знайдені в керамічній стороні.

Мікроструктура та механічні властивості з'єднань нержавіючої сталі та титанового сплаву при лазерному зварюванні та паянні з використанням сплаву 63Sn–37Pb в якості металевго наповнювача. *Yan Zhang, YanKun Chen, JianPing Zhou, DaQian Sun, HongMei Li*, pp. 257–266.

Лазерне зварювання та паяння сплаву титану TC4 (Ti) до нержавіючої сталі 304 (SS) було проведено із застосуванням сплаву 63Sn–37Pb в якості металевго наповнювача. На основі керування утворенням інтерметалідів Ti–Fe в зоні з'єднання був запропонований новий спосіб зварювання з'єднань SS–Ti. Одним із способів було зварювання в одному проході, що передбачає створення з'єднання з одним плавким зварним швом чи одним паяним. Коли лазерний промінь на стороні SS становив 1,4 мм, SS не було повністю розплавлено в зоні з'єднання. Через теплопровідність неоплавленого SS металевий наповнювач розплавився і заповнив простір в зоні з'єднання SS–Ti. Паяний шар утворювався на межі сплаву SS–Ti з основною мікроструктурою $Fe_3Sn + Fe_3Sn_2$, (β Sn, Pb),

* «Welding in the World», Vol. 64, Issue 2

(β Sn) + Sn_2Fe і (β Sn) + Sn_3Ti_2 . При випробуванні з'єднання зламалося на паяному шві з максимальною міцністю на розрив 108 МПа.

Дифузія водню в стійкому до повзучості багатошаровому зварному металі P91 (9%Cr). *Michael Rhode, Tim Richter, Peter Mayr, Alexander Nitsche, Tobias Mente, Thomas Böllinghaus*, pp. 267–281.

Зварені компоненти сталі P91 з 9% Cr потребують ретельного зварювання з необхідною термообробкою після зварювання. Перед PWHT необхідна термічна обробка для видалення водню, щоб уникнути розтріскування, пов'язаного з воднем (HAC). У цьому контексті важлива мікроструктура та температурно-залежна дифузія водню, а надійні коефіцієнти дифузії металургії шва P91 є рідкісними. З цієї причини дифузійну поведінку багатошарового металургії зварного шару P91 досліджували на стан зварювання (AW) та PWHT шляхом експериментів електрохімічного проникнення при кімнатній температурі та гарячому відведенні носія газу (CGHE) при температурі від 100 до 400 °C. Розраховували коефіцієнти дифузії водню та вимірювали відповідну концентрацію водню. Було встановлено, що обидві умови термічної обробки показують значні відмінності. При кімнатній температурі стан AW показав значне захоплення водню, виражене в сім разів меншими коефіцієнтами дифузії. Переважний напрямок дифузії було знайдено в перпендикулярному напрямку, вираженому високою проникністю. Експерименти CGHE виявили менші коефіцієнти дифузії для умови AW до 400 °C. У зв'язку з цим, водень з концентрацією приблизно 21 мл/100 г залишався ще захопленим при 100 °C. З цієї причини не може бути включена певна схильність зварного металургії шва P91 до HAC і слід проводити видалення водню перед PWHT.

Шов багатопрхідного дугового зварювання супердуплексної нержавіючої сталі. *Vahid A Hosseini, Kjell Hurtig, Leif Karlsson*, pp. 283–299.

Дане дослідження має на меті дослідити геометрію металургії шва та еволюцію мікроструктури його під впливом термічних циклів при багатопрхідному захищеному дуговому зварюванні (MIG) супердуплексної нержавіючої сталі товщиною 13 мм. Шов складався з чотирьох проходів, вироблених з енергією дуги 0,81...1,06 кДж/мм. Верхній валик виявив мінімальну частку основного металургії (ВМ), ніж перший валик. Теплові цикли фіксувались термопарами, що свідчить про зменшення швидкості охолодження в зоні зварного шва при додаванні нового наплавленого шару. Феритова частка в структурі шва в умовах зварювання була нижчою для верхніх валиків. Морфологія зерна аустеніту в прогрітих проходах змінювалася залежно від локальних пікових температур та

кількості проходів (повторних нагрівів). Сигма-фаза виділяється в дільницях металу, повторно нагрітому третім та четвертим проходами, який піддавався критичній піковій температурі для виділення σ -фази. Вміст фериту, виміряний за допомогою аналізу зображень та методики Fisher FERITSCOPE, показав, що феритова частка рухається у напрямку 50/50% у металі зварного шва зі збільшенням кількості циклів повторного нагрівання. Нарешті, було представлено схематичну карту, що показує огляд мікроструктури в багатопрхідному шві.

Вплив оптичної методики вимірювання та підходу оцінювання на визначення локальних параметрів геометрії зварювання для різних типів зварних швів. *Jan Schubnell, Matthias Jung, Chanh Hieu Le, Majid Farajian, Moritz Braun, Sören Ehlers, Wolfgang Fricke, Martin Garcia, Alain Nussbaumer, Jörg Baumgartner*, pp. 301–316.

З'єднання за допомогою зварювальних процесів деталей зазвичай пов'язане із створенням додаткових виїмок та геометричних особливостей. Багаторазові дослідження показали, що існує чітка кореляція між локальною геометрією зварювання та терміном втомлення зварних з'єднань. Тим самим локальне збільшення локального напруження може виражатися коефіцієнтом концентрації напруги при переході від основного матеріалу до матеріалу наповнювача, так званому посиленню. Коефіцієнт концентрації напруги можна визначити для більшості типів зварних швів, якщо відомі геометричні параметри, такі як товщина пластини зварного шва і радіус кута. Однак стандартизованого методу визначення цих параметрів не існує. Окрім відомих 2D-методів вимірювання на поперечних перерізах з аналізом відбитків зварних швів, в останні роки для геометричного аналізу зварних з'єднань були застосовані нові 3D-методи, засновані на безконтактному оптичному вимірюванні. За допомогою цих методів велика довжина зварних швів може бути проаналізована за дуже короткий час і з малим зусиллям. Однак вплив вимірювальної системи (геометрична точність, бічна роздільна здатність) ще не був кількісно визначений. Крім того, у всіх відомих випадках застосування були використані різні алгоритми оцінювання. Це не дозволяє просте порівняння досліджуваних параметрів та результатів. У цьому круглому дослідженні робочого типу порівнюють визначення радіусів посилення зварних валиків і кутів з бічних сторін підсилення різними алгоритмами оцінювання та системами 3D-вимірювання та різними інститутами. Крім того, було реалізовано підхід для безпосереднього визначення коефіцієнтів концентрації напруги зварних швів шляхом перекладу складної форми зварного шва в 2D-кінцеве моделювання елемента. Результати цього прямого підходу порівнюються з коефіцієнтами концентрації напруги, визначеними опосередковано

з використанням геометричних параметрів, та тими, які розраховуються за встановленими формулами наближення.

Нова технологія проєкційного зварювання для з'єднання сталєво-алюмінієвих гібридних компонентів – частина 1: Технологія та її потенціал для промислового використання. *Anastasiia Zvorykina, Oleksii Sherepenko, Sven Jüttner*, pp. 317–326.

Мульти матеріальна конструкція пропонує економічно вигідні легкі рішення для автомобільних виробництв. Сталі надміцної міцності залишаються невід'ємною частиною легкої конструкції і все частіше застосовуються в поєднанні з компонентами, виготовленими з алюмінієвих сплавів, у конструкціях кузова. Для цих застосувань загальнозживані процеси з'єднання (клепки, затискання, зварювання опором, тощо) досягли своїх технологічних меж і тому необхідний подальший технологічний розвиток. У цьому дослідженні описана нова технологія з'єднання, що базується на способі зварювання опором для з'єднання вуглецевої сталі з високою міцністю 22MnB5 (AS150) з алюмінієвими листами зі сплаву AW 6016. Технологія складається з двоступеневого процесу точкового зварювання з додатковим простим рентабельним з'єднанням елементів. Його реалізація дозволяє з'єднувати алюміній і сталь на надзвичайно коротких ділянках (10 мм), використовуючи короточасне проєкційне зварювання з високою енергетичною концентрацією. З'єднувальні елементи – циліндри, виготовлені з дрітків на основі Cu і Fe діаметром 1,6 мм і довжиною 10 мм – були зварені за допомогою загального обладнання для точкового зварювання. Експериментальні результати показали, що всі випробувані матеріали для з'єднання різних сталє-алюмінієвих сполук можуть бути успішно використані, а діапазони струму зварювання достатньо для промислового застосування.

Вплив проникнення зварного шва на втомну міцність несучих хрестоподібних з'єднань. *Takeshi Hanji, Kazuo Tateishi, Yuko Ohashi, Masaru Shimizu*, pp. 327–334.

У цьому дослідженні було вивчено поведінку навантажувальних з'єднань з хрестоподібними елементами на втому при малоцикловому перевантаженні, що містять неповне проникнення. П'ять типів зразків з різними розмірами проникнення зварних швів були випробувані на циклічних пластичних деформаціях. Під час випробувань на бічній поверхні зразка спостерігали тріщинність. Результати випробувань показали, що втомна міцність та розтріскування залежать від відношення проникнення зварного шва до основної товщини пластини та відношення довжини кореня зварного шва до товщини пластини п'ятих типів відповідно. Потім були проведені аналізи кінцевих елементів, включаючи концепцію ефективної висічки. Результати вказують на те, що втомна міцність і розтріскування зразків можна співвіднести з ло-

кальним розподілом деформацій навколо ефективної виїмки.

Мікроструктурна характеристика зварної точки при подвійному імпульсному зварюванні опором високоміцної сталі (1200 МПа). *Manfred Stadler, Martin Gruber, Ronald Schnitzer, Christina Hofer*, pp. 335–343.

В автомобільній промисловості точкове зварювання опором є домінуючою технологією при з'єднанні листових металів із прогресивних високоміцних сталей. З метою поліпшення механічних характеристик зварних швів можливий підхід загартовування за допомогою другого імпульсу. У цій роботі було застосовано дві різні схеми зварювання з подвійним імпульсним зварюванням для сталі, спричиненої трансформацією 1200 МПа, що сприяє перетворенню пластичності (TRIP). Охарактеризували різні мікроструктури зварних швів за допомогою світлооптичної та скануючої електронної мікроскопії. Крім того, було проведено зіставлення твердості з кількома сотнями вимірювань. Показано, що другий імпульс після низького першого імпульсу, який є достатньо високим для отримання зварювального якісного шва, який відповідає критерію якості мінімального діаметра точкового зварного шва, призводить до часткової реаустенізації та, отже, до феритної / мартенситної мікроструктури після остаточного гасіння. Зображення твердості показало, що цей внутрішній ФЗ важче, ніж навколишній ФЗ, який складається із загартованого мартенситу. На відміну від цього, якщо для першого імпульсу обраний найвищий струм без бризок, той самий другий імпульс не реаустенізує ФЗ, а лише гартує мартенсит.

Експериментальний аналіз впливу швидкості потоку та типу газу на різання дуги плазмою hardox-400. *Deepak Kumar Naik, Kalipada Maity*, pp. 345–352.

Цей дослідний документ демонструє експериментальне дослідження різання дуги плазмою hardox-400 з використанням різних типів плазмових газів. Природа та поведінка плазмової дуги були вивчені, та описані вплив плазмового газу на заготовлю. Експерименти проводилися на 10-мм hardox-400 за допомогою плазморізальної машини з ЧПУ. Вибраний матеріал заготовки має дуже хороші механічні властивості, такі як висока в'язкість, хороша гнучкість і хороша зварюваність. Ця спеціальна стійкість до стирання використовується в частині виготовлення фронтальних навантажувачів, ковшів, барж та різного гірничого обладнання. Для цього експерименту було обрано чотири різні плазмові гази, тобто повітря, аргон, кисень та азот. Термофізичні властивості плазмових газів, властивості генерованої дуги, продуктивність різання та енергетичний баланс пояснюються для різних використовуваних плазмових газів. Виміряли форму і швидкість видалення матеріалу (MRR) завдяки створеній дузі та проаналізували ефект. У цій роботі роз'яснюється потенціал про-

цесу різання шляхом зміни швидкості потоку та хімічного складу плазмового газу.

Числове моделювання динамічної поведінки у процесі передачі короткого замикання. *Satoshi Eda, Yosuke Ogino, Satoru Asai*, pp. 353–364.

Існує великий попит на підвищення ефективності та якості зварювання, особливо для зварювання металевими дугами у захисних газах, яке має широке промислове застосування. Більше того, незалежний контроль введення тепла та швидкості плавлення також важливий для деяких застосувань, таких як зварювання різного матеріалу та адитивному виробництві «дротяної» дуги, що потребує низького введення тепла, незважаючи на більш високу швидкість плавлення, що керований процес передачі короткого замикання буде якісним та високопродуктивним процесом. У цьому процесі передача короткого замикання стабільно та періодично повторюється, щоб забезпечити низький вхід тепла та високу швидкість плавлення, а в певній мірі було досягнуто незалежне регулювання введення тепла та швидкості плавлення. Однак коефіцієнти контролю над подачею тепла та швидкістю осадження в цьому процесі недостатньо чіткі через відсутність досліджень для цього процесу. У цьому дослідженні ми дослідили явища зварювання керованого процесу передачі короткого замикання, розробивши єдину модель дуги-електрода. У цій моделі був проведений процес передачі короткого замикання, включаючи згасання та відновлення плазми дуги, і спостерігалось динамічна поведінка дуги та розплавленого металу. Отримані результати добре узгоджувались з експериментальними вимірюваннями. Крім того, ми також визначили коефіцієнти управління подачею тепла до електродів.

Вплив активного нагрівання та охолодження на мікроструктуру та механічні властивості з'єднань алюмінієвого сплаву з титаном, виконаних зварюванням тертям з перемішуванням. *Prins Patel, Harikrishnasinh Rana, Vishvesh Badheka, Vivek Patel, Wenya Li*, pp. 365–378.

Стик сплава AA6061 з чистим Ti був зварен за допомогою фрикційного зварювання (FSW) з допоміжними умовами охолодження та нагрівання, спрямована на досягнення бездоганного з'єднання. Охолодження при фрикційному зварюванні з перемішуванням (CFSW) здійснювалося з різним охолоджуючим середовищем, таким як CO₂, стиснене повітря та вода з регульованою витратою. Однак нагрівання за допомогою нагрівання при фрикційному зварюванні (HFSW) проводили з джерелом нагріву факела GTAW безпосередньо перед інструментом при різній щільності струму. Підготовлені зразки піддавали оптичній мікроскопії, скануючій електронній мікроскопії та електророзрядній спектроскопії для мікроструктурних характеристик. На міцність на розрив та мікротвердість суттєво впливали різні умови охолодження та нагрівання,

що пояснюється чіткою часткою інтерметалічних сполук (ІМК), що виявляються в мікроструктурі. Зразки, підготовлені з умовами охолодження, мали чудові властивості зразка порівняно з нормальними та нагрівальними умовами.

Еволюція мікроструктури металу шва типу 2.25Cr-1Mo-0.25V при дуговому зварюванні під флюсом. *Hanna Schönmaier, Fred Grimm, Ronny Krein*, pp. 379–393.

Теплостійкий модифікований ванадієм метал шва типу 2.25Cr-1Mo-0.25V зазвичай використовується в нафтохімічній промисловості для товстостінних посудин високого тиску з високотемпературним водневим середовищем. Для підвищення ефективності реактора зварні шви повинні витримати ще більш високі температури та тиск. Голчастий ферит (ГФ) часто розглядають як оптимальну мікроструктуру завдяки гарному поєднанню міцності та в'язкості. Оскільки мало літератури про еволюцію мікроструктури та кінцевих складових мікроструктури зварного металу 2.25Cr-1Mo-0.25V, нинішній документ має намір забезпечити вичерпну інформацію за допомогою мікроскопії, кристалографічного дослідження шляхом дифракції розсіяних зворотних електронів та спостереження *in situ* перетворення аустеніту в феритну фазу за допомогою високотемпературної лазерної скануючої конфокальної мікроскопії (HT-LSCM). Досліджений метал зварного шва виявляє високу щільність складних алюмінієво-кремній-марганцевих оксидів із сферичною формою та великі зерна первинного аустеніту, що в поєднанні сприятливо для внутрішньозернистого зародження ГФ. Тим не менш, обстеження кінцевої мікроструктури після перетворення було недостатнім для однозначного твердження про наявність ГФ в металі зварного шва 2.25Cr-1Mo-0.25V. За допомогою *in-situ* HT-LSCM спостереження за фазовим перетворенням було виявлено внутрішньозеренне зародження ГФ на неметалічних включеннях в межах аустенітних зерен, що підтверджує, що навіть якщо мікроструктура зварного металу 2.25Cr-1Mo-0.25V в основному є бейнітною, в ній також присутня мала кількість ГФ.

Управління мікроструктурою при адитивному виробництві «дротяною дугою» з компонентів на основі міді. *Justin Baby, Murugaiyan Amirthalingam*, pp. 395–405.

«Дротяну дугу» привабливо застосувати для отримання унікальних, складних і великих розмірів компонентів. Однак багатопрехідні теплові цикли

осадження при процесі WAAM часто породжують стовпчасті зернові структури в мікроструктурах компонентів. Ці компоненти проявляють анізотропні механічні властивості, що робить їх непридатними для основних технологічних застосувань. У цій роботі були вивчені характеристики перенесення металів у методі WAAM на основі дуги з захисним газом (MAG) та його вплив на еволюцію мікроструктури, щоб запропонувати оптимальну техніку осадження для отримання зрівняних зерен, що містять мікроструктури. Результати показали, що мікроструктура осадження звичайного імпульсного режиму містила довгі і стовпчасті зерна, тоді як осадження з коротким замиканням виробляли випадковим чином орієнтовані рівнодольні зерна. Для дослідження та оптимізації характеристик передачі металу було використано високошвидкісне фотографування камери. Для підтвердження ізотропного характеру відкладів було проведено детальний мікроскопічний аналіз та випробування на розтяг.

Уникнення кінцевих недосконалостей кратера при високопотужному зварюванні лазерним променем закритих окружних зварних швів. *Sergej Gook, Ömer Üstündağ, Andrey Gumenyuk, Michael Rethmeier*, pp. 407–417.

У цій роботі йдеться про розробку стратегії запобігання кінцевих дефектів кратерів при потужному лазерному зварюванні товстостінних окружних зварних швів. Була проведена серія експериментів, щоб зрозуміти вплив параметрів зварювання на утворення дефектів кінцевих кратерів, таких як пори, тріщини, надлишковий корінь металу і порожнини усадки в області перекриття. Різке відключення живлення лазера при закритті окружного зварного шва призводить до утворення отвору, який проходить через всю товщину зварного матеріалу. Лазерне нарощування потужності викликає тріщини затвердіння, які ініціюються при переході від режиму повного проникнення до часткового проникнення. Розфокусування лазерного променя призвело до перспективних результатів в частині уникнення кінцевих дефектів кратера. Тріщини і пори в області перекриття можна ефективно уникнути, використовуючи методи розфокусування. Стратегія уникнення недоліків кінцевих кратерів була випробувана на плоских зразках сталі марки S355 J2 товщиною стінки від 8 до 10 мм, а потім перенесена на трубопровідні секції товщиною 10 мм, виготовлені з високоміцної трубопровідної сталі API5L-X100Q.



**ЖУРНАЛИ
для професіоналів**

(380-44) 200-8277

journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

TransTig 170/210: розширений набір можливостей TIG та MMA з мінімізацією витрат

Зварювання вольфрамовим електродом у середовищі інертного газу (TIG). Жоден інший метод не забезпечує такої чистоти та якості зварного шва. Щоб максимально спростити процес зварювання TIG, компанія Fronius створила TransTig 170/210. Ця компактна система для зварювання TIG у ручному режимі вирізняється широким функціоналом для забезпечення ідеальних результатів зварювання.

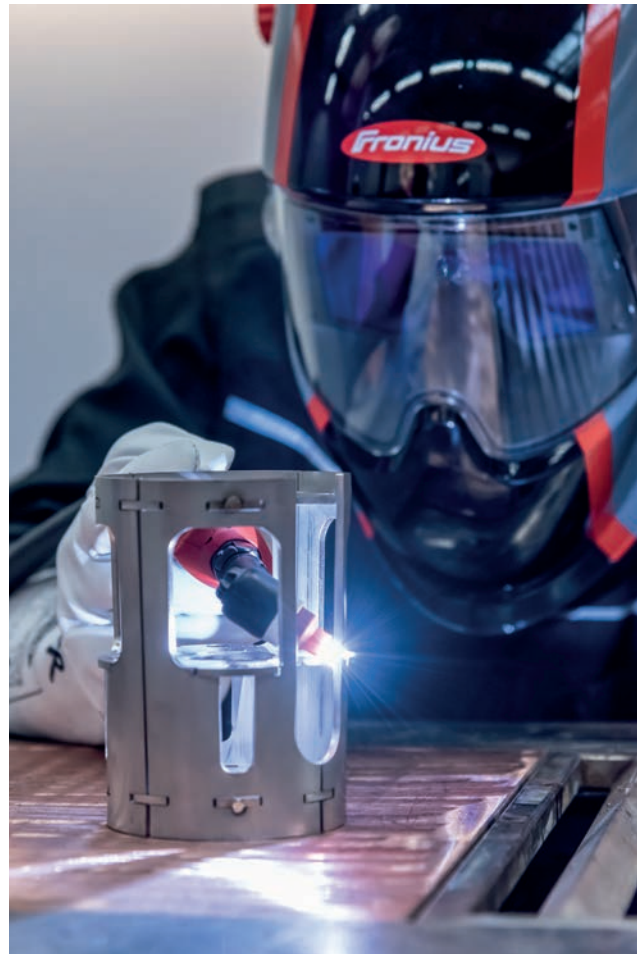
Зварювання TIG застосовується в багатьох випадках: для з'єднання компонентів із будь-якого металу, роботи з тонкими листами, зварювання у незручному положенні та виконання кореневих проходів. При цьому можна використовувати присадний матеріал або обійтися без нього. Указаний метод зварювання чудово підходить для промислових потреб, зокрема, використовується під час виготовлення, обслуговування, монтажу і ремонту заводського обладнання, трубопроводів і різноманітних резервуарів. Таке устаткування виробляється переважно з нержавіючої сталі та алюмінію, тож якість зварних швів дуже важлива. Крім того, компактну і надійну систему TransTig зручно брати з собою на об'єкти та застосовувати для виконання найрізноманітніших завдань.

Нове покоління пристроїв для зварювання TIG постійним струмом від компанії Fronius вирізняється компактною конструкцією та широким спектром можливостей. Незважаючи на мобільні розміри і невелику вагу (лише 10 кг), нові моделі TransTig 170 і TransTig 210 не поступаються функціоналом професійним пристроям стандартного розміру. Розробники добилися максимально ефективного використання вхідної напруги, що зумовлює ощадливе енергоспоживання, а також надзвичайну надійність і продуктивність систем TransTig. Робочий цикл компактних пристроїв для зварювання TIG становить 40 %, а безперервна робота за максимальної вихідної потужності триває куди довше, ніж у інших моделей – цілих 4 хв.

Крім того, компенсація реактивного струму (PFC) системи TransTig забезпечує високий рівень допуску на напругу в мережі. Навіть за зниження вхідної напруги на 30 % пристрої працюватимуть із максимальною потужністю. Таким чином, функція PFC передбачає максимально ефективне використання доступного мережевого струму. Регулятором Fuse



Функції системи TransTig стануть у пригоді під час виконання різноманітних завдань



Такі додаткові можливості, як функція сенсорного високочастотного підпалювання і компактний зварювальний пальник (додаткова комплектація), спрощують зварювання компонентів у незручному розташуванні



Простий і зрозумілий принцип роботи TransTig покращує ефективність зварювання



Окремі функції систем TransTig 170 і TransTig 210, зокрема Anti-Stick, HotStart, зниження струму та імпульсне зварювання, забезпечують чудовий результат під час зварювання електродом

в ручному режимі від Fronius захищені від бризок води і підходять для роботи в складних умовах на будівельних майданчиках чи під час монтажу обладнання. З метою заощадження енергії системи TransTig через заданий проміжок часу автоматично переходять у режим очікування.

Fronius International — австрійська компанія з головним офісом в місті Петтенбах і відділеннями в містах Вельс, Тальхайм, Штайнхаус і Замтледт. Компанія, штат якої налічує 4760 співробітників по всьому світу, працює в галузях зварювального обладнання, фотовольтаїки та систем для заряджання акумуляторних батарей. Близько 92 % продукції компанії постачається на експорт за допомогою 30 міжнародних дочірніх компаній Fronius, а також мережі торгових партнерів і представників у більш ніж 60 країнах. Компанія Fronius пропонує інноваційні продукти та послуги, а також володіє 1253 чинними патентами, що робить її світовим лідером інновацій.

зварювальник адаптує максимальний рівень отриманого з мережі струму до конкретних умов роботи – наприклад, під час зварювання на будівельних майданчиках, де ввімкнено велику кількість пристроїв. Це також уможливлює зварювання за використання довгих мережевих кабелів та недостатньо надійних плавких запобіжників або під час роботи генератора.

За результатом зварювання компактні системи TransTig аж ніяк не поступаються пристроям стандартного розміру. Вони пропонують універсальний режим зварювання MMA, що включає режим CEL і різноманітні функції для зварювання TIG. Завдяки функції точкового зварювання (TAC) процес прихоплення компонентів став простішим і вдвічі швидшим за стандартний. Додаткова функція наростання і спадання дає змогу знизити струм для заміни зварювального прутка або зварювання в точках прихоплення. Силу струму можна зменшувати або навіть збільшувати відносно показника мережевого струму. Період продувки газу задається вручну або автоматично з огляду на рівень використовуваного зварювального струму. Сенсорна функція високочастотного підпалювання спрощує початковий етап зварювання: підпалювання високочастотної дуги відбувається через заданий час після виявлення контакту з деталлю та в точно визначеному місці. Це дає можливість використовувати пальники без кнопок та спрощує завдання, якщо інтерфейс установки залишився поза зоною досяжності.

Особливою системою TransTig роблять не тільки новітні технології. У неї простий та зрозумілий принцип роботи, зручні кнопки й перемикачі, яскравий дисплей з LED підсвіткою. Незважаючи на невелику вагу, корпус дуже міцний і, як довели випробування, витримує навіть більше механічних навантажень, ніж передбачено стандартом. Крім того, системи для зварювання