

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 2023 9 З В А Р Ю В А Н Н Я

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

МЕТАЛОЗНАВСТВО

Гак І.С., Задерій Б.О., Звягінцева Г.В., Завдовцев А.В., Олійник Ю.В. Кристалографічні та розмірні характеристики елементів структури зварних швів монокристалів жароміцних нікелевих сплавів3

ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

Жданов С.Л., Позняков В.Д., Завдовцев А.В., Герасименко А.М., Синьок О.Г., Максименко А.О. Структура і властивості зварних з'єднань сталі 06Г2БДП 11

Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П. Зварювальні технологічні властивості порошкового дроту, шихта якого містить лігатуру з бором 17

ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

Майстренко А.Л., Беженар М.П., Заболотний С.Д., Дутка В.А., Черв'яков М.О., Степанець А.М., Гнатенко І.О., Цисар М.О. Теплові процеси і еволюція структури нержавіючих сталей при зварюванні тертям з перемішуванням інструментом з рсВН21

ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ

Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В., Федорчук В.Є., Костін В.А., Пузрін О.Л. Дифузійне зварювання магнієвого сплаву МА2-1 через проміжний прошарок з цинку29

ЗВАРЮВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Гончаров І.О., Головка В.В., Пальцевич А.П., Дученко А.М. Вдосконалення технології виготовлення низьководневих агломерованих флюсів з використанням плавлених матеріалів34

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Колісниченко О.В., [Тюрін Ю.М.] Властивості покриттів, напилених багатокамерним детонаційним пристроєм та їх застосування39

ІНФОРМАЦІЯ

Міжнародному інституту зварювання 75 років45

Fronius WeldCube Navigator. Повний контроль над кожним швом61

Людина, яка прийшла з майбутнього. Пам'яті В.М. Глушкова63

CONTENT

METAL SCIENCE

Gakh I.S., Zaderyi B.O., Zviagintseva G.V., Zavdoveyev A.V., Oliinik Yu.V. Crystallographic and dimensional characteristics of structure elements in welds of high-temperature nickel alloy single crystals3

TECHNOLOGY OF ARC WELDING AND SURFACING

Zhdanov S.L., Poznyakov V.D., Zavdoveyev A.V., Herasimenko A.M., Synyok O.G., Maksymenko A.O., Structure and properties of welded joints of 06G2BDP steel 11

Ryabtsev I.O., Babinets A.A., Lentyugov I.P. Welding-technological properties of flux-cored wire with boron-containing binder in the charge 17

FRICITION STIR WELDING

Maistrenko A.L., Bezhenar M.P., Zabolotnyi S.D., Dutka V.A., Chervyakov M.O., Stepanets A.M., Gnatenko I.O., Tsysar M.O. Thermal processes and evolution of stainless steel structure in friction stir welding with a tool from pcBN21

DIFFUSION WELDING

Fachenko Yu.V., Petrushynets L.V., Fedorchuk V.Ie., Kostin V.A., Puzrin O.L. Diffusion welding of magnesium alloy MA2-1 through a Zinc interlayer29

WELDING MATERIALS

Goncharov I.O., Holovko V.V., Paltsevych A.P., Duchenko A.M. Improvement of the technology of manufacturing low-hydrogen agglomerated fluxes using fused materials34

PROTECTIVE COATINGS

Kolisnichenko O.V., [Tyurin Yu.M.] Properties of coatings, deposited by multichamber detonation device and their application39

INFORMATION

The International Institute of Welding: 75 years45

Fronius WeldCube Navigator. Full control over every seam61

The man who came from the future. In memory of V.M. Hlushkova63



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



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

Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
І.В. Кривцун (головний редактор),
В.М. Ліподаєв (штатний заст. гол. ред.)
О.М. Берднікова, В.В. Книш,
В.М. Коржик, Ю.М. Ланкін,
Л.М. Лобанов, С.Ю. Максимов,
О.В. Махненко, М.О. Пашчин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев;
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;
Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко, Міжнародна
Асоціація «Зварювання», Київ

Засновники

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

Адреса

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

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2024

Передплатний індекс 70031.
6 випусків на рік (видається раз на два місяці).
Друкована версія: 1800 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделлою.
Електронна версія: 1800 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Передплата можлива на попередні випуски за любий рік.
Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевідаються англійською мовою в журналі
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

Founders

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

Address

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

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal

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

Subscription 2024

Subscription index 70031.
6 issues per year, back issues available.
\$192, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
\$156, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
Subscription is possible for previous issues for any year.

Articles from «Автоматичне Зварювання» (Automatic Welding)
journal is republished selectively in English in
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

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

Підписано до друку 28.09.2023.
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7,44
Друк ТОВ «ДІА».
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

КРИСТАЛОГРАФІЧНІ ТА РОЗМІРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРИ ЗВАРНИХ ШВІВ МОНОКРИСТАЛІВ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

І.С. Гах, Б.О. Задерій, Г.В. Звягінцева, А.В. Завдовесв, Ю.В. Олійник

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

Розглянуті кристалографічно-орієнтаційні та розмірно-морфологічні особливості мікроструктури зварних з'єднань монокристалів жароміцних нікелевих сплавів в залежності від вихідної кристалографічної орієнтації та її зміни по макрофронті кристалізації зварного шва. З залученням методу EBSD-аналізу (Electron Backscattering Diffraction) та оптичної металографії досліджено особливості структури окремих зон зварних з'єднань монокристалів жароміцних нікелевих сплавів. Встановлена їх залежність від вихідної кристалографічної орієнтації зварного з'єднання та її зміни по макрофронті кристалізації зварювальної ванни. Показано, що поряд з переважним наслідуванням металом шва кристалографічної орієнтації основного металу може мати місце формування зеренної структури різної кристалографічної орієнтації, морфології, розмірів та природи – кристалізаційної та деформаційної. Розглянуто механізми утворення зерен вказаної природи. Границі зерен кристалізаційного типу є місцем стикування блоків дендритів різної кристалографічної орієнтації. Зерна деформаційного типу є результатом релаксації мікронапружень на стадії охолодження зварного з'єднання і формуються на ділянках, в яких напрямок діючих напружень найбільше співпадає з кристалографічною орієнтацією легкого ковзання. Також виявлено, що зерна деформаційного типу можуть виникати як в металі шва, так і в зоні термічного впливу. При однакових температурних умовах виконання зварних з'єднань кількісні та розмірно-орієнтаційні параметри деформаційної структури металу зони термічного впливу корелюють з аналогічними параметрами елементів структури шва. Вказується на можливість отримання зварних швів без тріщин з досконалою монокристалічною структурою. Бібліогр. 18, рис. 8.

Ключові слова: монокристали, жароміцні нікелеві сплави, зварні з'єднання, EBSD-аналіз, кристалографічна орієнтація, параметри структури, природа зерен, зварювальна ванна, макрофронт кристалізації

Робота пов'язана з постійнозростаючими запитами на підвищення тактико-технічних, експлуатаційних, виробничих та екологічних характеристик газотурбінних двигунів (ГТД), енергетичних установок (ГТУ) як військового, так і громадянського призначення [1–3]. Як відомо, зростання термодинамічних характеристик ГТД, ГТУ досягається, головним чином, за рахунок підвищення температури газу на вході в турбіну та зниження металоємності і маси ротору, що потребує створення та використання нових високожароміцних матеріалів [4, 5]. Підвищення жароміцності за рахунок ускладнення легування, застосування сплавів, особливо з монокристалічною структурою, досягло зараз межі, в зв'язку з погіршенням при цьому їх технологічності. Тому більшість конструкторів та виробників ідуть по шляху вдосконалення конструкції турбіни, в т.ч. з застосуванням зварювання [3, 6]. Однак чим вища жароміцність сплавів, тим гірша їх зварюваність, що проявляється у високій схильності жароміцних нікелевих сплавів до тріщиноутворення та руйнування спеціально створеного структурного стану, особливо, монокристалічності, яка забезпечує оптимальне поєднання механічних характеристик у широкому діапазоні температур та навантажень.

Гах І.С. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-4234>, Задерій Б.О. – <https://orcid.org/0000-0001-6695-6986>, Звягінцева Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6450-4887>, Завдовесв А.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2811-0765>, Олійник Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-9293-4315>

© І.С. Гах, Б.О. Задерій, Г.В. Звягінцева, А.В. Завдовесв, Ю.В. Олійник, 2023

Більша частина публікацій, які стосуються питань зварювання монокристалів жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) розглядають умови виникнення та попередження утворення в швах так званих дефектів монокристалічної ростової структури та тріщин [7–10]. Результати вивчення механічних характеристик та особливостей руйнування зварних з'єднань [11, 12] вказують на необхідність більш детального дослідження структурно-орієнтаційних змін, які мають місце в результаті термодіформіювального впливу при зварюванні. Зокрема, це стосується спектру кристалографічної орієнтації як в цілому, так і окремих складових структури: наявності локальних структур, мікронапружень та деформацій; характеру, морфології, розміру структурних елементів, границь та величини їх розорієнтування – факторів, які визначають механічні та службові характеристики зварних з'єднань.

Метою роботи є визначення впливу вихідної кристалографічної орієнтації зразків на особливості структурних характеристик зварного з'єднання монокристалів ЖНС та її зміни по ширині шва.

Методика досліджень. При дослідженні були обрані промислові жароміцні нікелеві сплави з вмістом інтерметалідної дисперснозміцнюючої

γ' -фази понад 61 %, які широко використовуються в якості конструкційного матеріалу при виготовленні робочих лопаток гарячого тракту авіаційних ГТД.

Виконані нами [8, 9] та іншими авторами [7, 10] дослідження з вивчення кристалографічної орієнтації з'єднання та впливу кривизни макрофронту кристалізації зварювальної ванни на успадкування вихідної кристалографічної орієнтації металом шва та досконалість його структури показали, що для попередження утворення зерен і тріщин необхідно забезпечити обмеження відхилення напрямку проходження температурного градієнту по фронті кристалізації від напрямку $\langle 001 \rangle$. Технологічно це досягається відповідністю площини кромки зварного стику орієнтації високої симетрії $\{100\}$ і формуванням макропластичного фронту кристалізації зварювальної ванни. При аналізі можливих варіантів кристалографічної орієнтації з'єднання зварюваних зразків (площини вихідного металу $\{UVW\}$ і напрямів зварювання $\langle hkl \rangle$), були обрані дві основні кристалографічні комбінації: $\{001\}$, $\langle 100 \rangle$ та $\{110\}$, $\langle 011 \rangle$. Збирання зразків обраних кристалографічних орієнтацій для зварювання виконувалось з точністю до 5° . Дослідні зразки орієнтації $\{110\}$, $\langle 011 \rangle$ в окремих випадках мали відхилення від обраної в межах 10° , що може обумовити при зварюванні різну величину кута відхилення максимального температурного градієнту по фронті кристалізації від напрямку $\langle 001 \rangle$ [8]: до 15° – сприятливі, вище зазначеного рівня – несприятливі умови формування монокристалічної структури. Зразки завтовшки 2 мм для зварювання вирізали електроіскровим методом із монокристалічних відливок, отриманих шляхом високоградієнтної спрямованої кристалізації, з наступним шліфуванням та травленням.

Зварювання виконували електронним променем на режимах, при яких забезпечується стабільне формування наскрізного рівномірного провару та температурно-часові умови формування монокристалічної структури.

В останні роки для оцінки структурних змін моно- та полікристалічних матеріалів внаслідок технологічних та експлуатаційних впливів знаходить успішне застосування метод EBSD-аналізу (Electron Backscattering Diffraction) завдяки автоматизованому поєднанню покорокової оцінки локальних (0,05...1,0 мкм) структурно-деформаційних змін і наступній побудові узагальнених картин [13, 14]. Його використання дозволяє отримати більш широку інформацію в порівнянні з традиційними методами оцінки структури: рентгеноструктурного, дифракції електронів в ПЕМ, нейтронної дифракції, оптичної металографії та ін., які головним чином спрямовані на виявлення

та наступне дослідження основних дефектів ротової структури монокристалів, таких як струменева ліквіація, «паразитні» зерна, поверхневі карбіди та ін. В той же час відомо, що одним із шляхів задоволення високих вимог до механічних та експлуатаційних характеристик ЖНС є оптимізація параметрів їх структури [12–16]. Тому все більшої актуальності набуває більш детальна кількісна та якісна оцінка структури і розробка методів управління формуванням при зварюванні.

Переваги методу EBSD-аналізу особливо проявляються при дослідженнях зварних з'єднань монокристалів, які являють собою композицію із різноструктурних кристалографічно різноорієнтованих ділянок. Його використання дає великий об'єм інформації, необхідної для оцінки еволюції структури з'єднань, важливої як при вирішенні теоретичних, так і прикладних питань формування і управління структурою в процесі зварювання. Однією з важливих переваг EBSD-аналізу є можливість визначення типу та співвідношення елементів структури, механізму її формування. При вивченні монокристалів основним об'єктом досліджень є наявність та характеристики границь зерен – основного фактору, який визначає працездатність конструкцій – їх тип, морфологія, параметри форми та розміри, орієнтування, питома частка кожного типу. Не менш важливим фактором і перевагою методу EBSD-аналізу зварних з'єднань є наочність подання кристалографічної орієнтації як окремих ділянок і елементів структури шляхом кольорового кодування на відповідних картах досліджень, так і в цілому.

Дослідження структурно-кристалографічного стану зварних з'єднань виконувалось на шліфах, виконаних з поверхні зразків, при використанні оптичного мікроскопу Neophot-32 та електро-

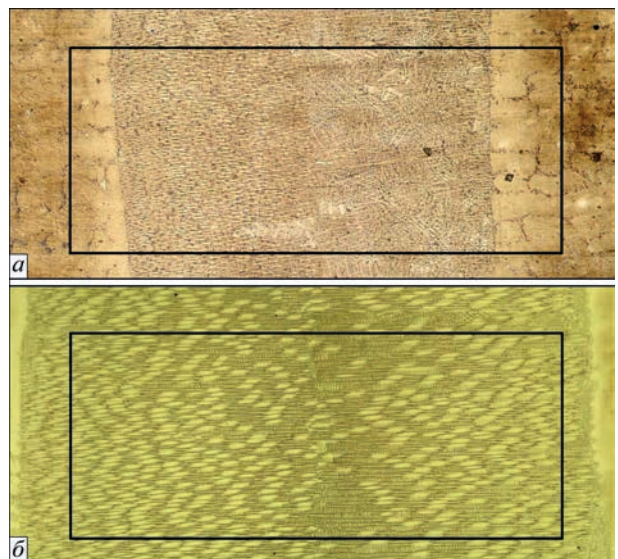


Рис. 1. Структура ($\times 50$) зварного з'єднання ЖНС з поверхнею зразка близькою до (101) (а) та (001) (б) з окресленими ділянками, які досліджувались методом EBSD

ного мікроскопу Verios 460 XHL з приставкою для EBSD-аналізу HKL Nordlys System. Загальна площа сканування електронним променем – 796×2000 мкм, локальність 2×4 мкм. Рис. 1. ілюструє область дослідження на зварних з'єднаннях методом EBSD-аналізу. Розглядалися виявлені в результаті металографічного аналізу характерні [16, 17] ділянки зварних з'єднань монокристалів: основний метал, зона термічного впливу, лінія сплавлення, зона епітаксiального росту та ділянки шва з різним відхиленням кристалографічної орієнтації від вихідної.

В окремих випадках кристалографічна орієнтація структури оцінювалась по фігурах металографічного травлення. Фіксація структури виконувалась з використанням оптичного мікроскопу. Візуалізація структури при цьому здійснювалась шляхом травлення поверхні шліфу.

Підготовка зразків для EBSD-аналізу включала спеціальну технологію «шліфування-полірування» [13, 14], яка дозволяє уникнути нагартування поверхні зразка, що забезпечує високу точність результатів. Акцент при дослідженні робився на зварних з'єднаннях та окремих їх ділянках, для яких виконувались, або ж не були забезпечені умови спрямованої кристалізації монокристалу та формування досконалої монокристалічної структури [7–9, 16, 17]. Розглядалися особливості кристалографічно-орієнтованих та розмірно-морфологічних характеристик окремих характерних зон зварних з'єднань в залежності від виконання зазначених вище умов.

Результати досліджень. Структура основного металу характеризується типовою розвинутою однорідною крупнодендритною будовою [15] з спрямованою кристалографічною орієнтацією (рис. 2, 3), яка відповідає орієнтації зразка в ціло-

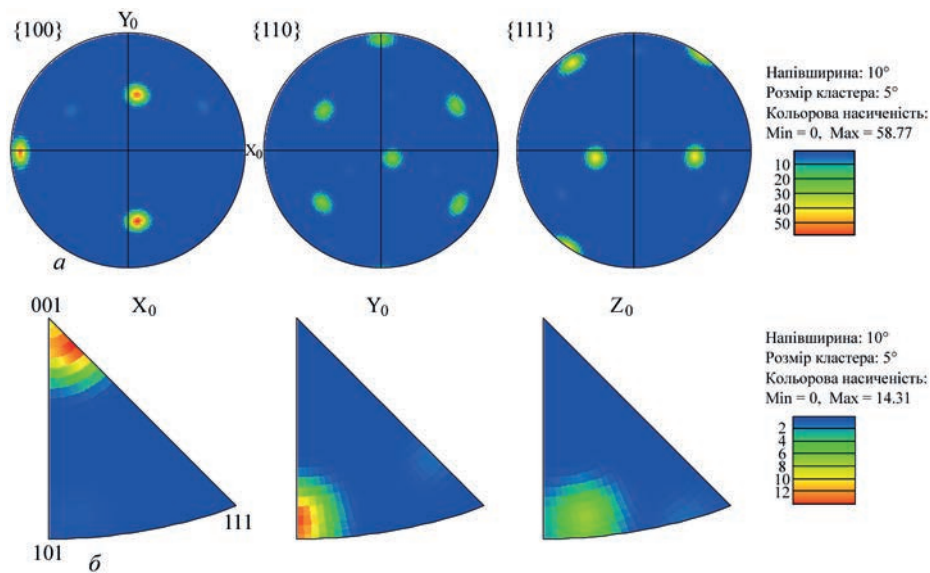


Рис. 2. Прямі (а) та зворотні (б) полюсні фігури основного металу зварного з'єднання монокристалічного ЖНС з поверхнею зразка близькою до (101)

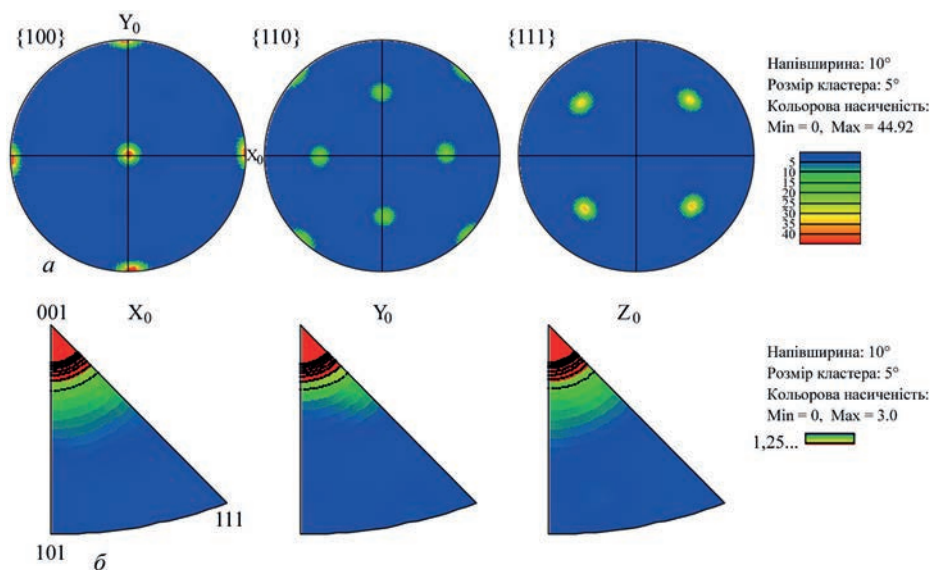


Рис. 3. Прямі (а) та зворотні (б) полюсні фігури основного металу зварного з'єднання монокристалічного ЖНС з поверхнею зразка (001)

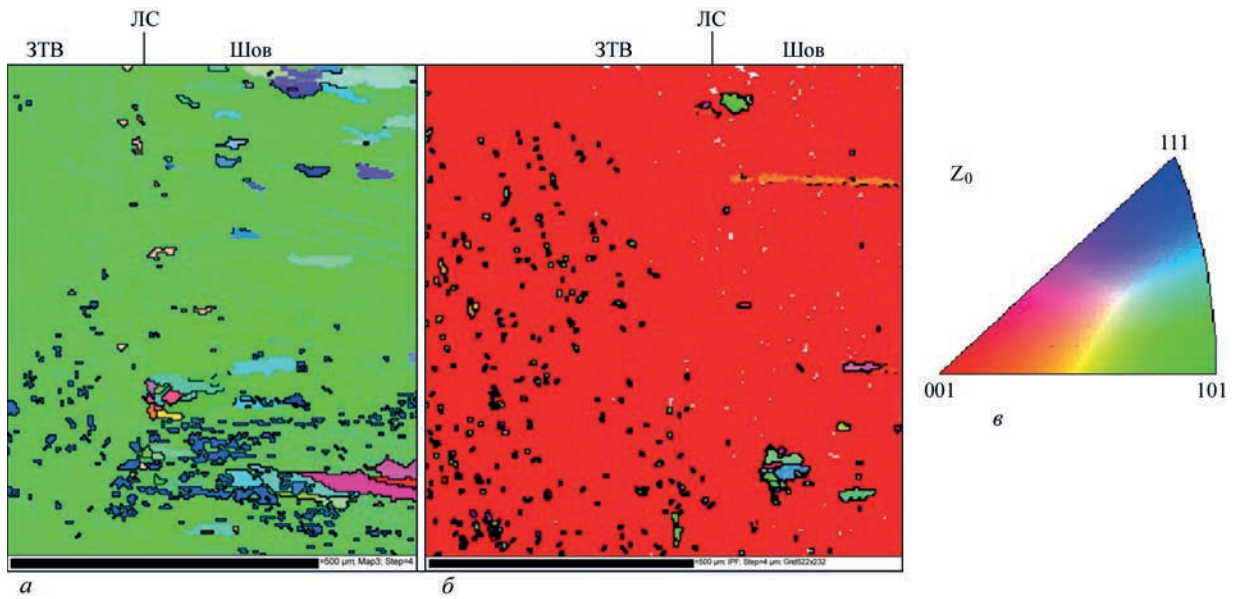


Рис. 4. Карти орієнтувань зони епітаксiального росту та дiлянки сплавлення зразкiв з поверхнею, близької до (101) (а) i (001) (б) ЖНС, при вiдповiдностi вихiднiй кристалографiчнiй орієнтацiї (КГО) умовам спрямованої кристалiзацiї. КГО-легенда до карти орієнтувань (в). ЗТВ – зона термiчного впливу, ЛС – лiнiя сплавлення

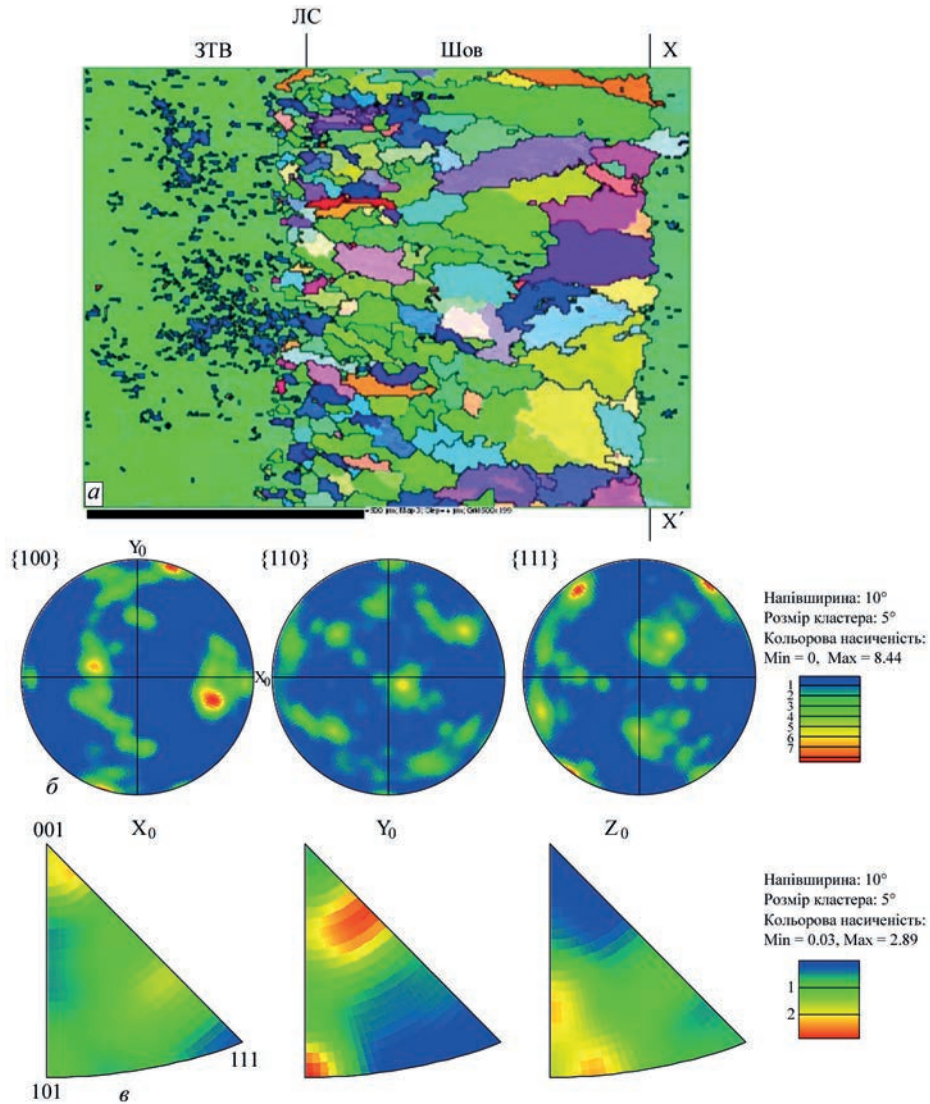


Рис. 5. Карти орієнтувань (а) дiлянки зварного з'єднання з поверхнею зразка близькою до (101), прiямi (б) та зворотнi полюснi фiгури (в) при невідповідностi дiлянки шва умовам спрямованої кристалiзацiї. КГО-легенда до карти орієнтувань (див. рис. 4, в). ЗТВ – зона термiчного впливу, ЛС – лiнiя сплавлення, X-X' – вiсь шва

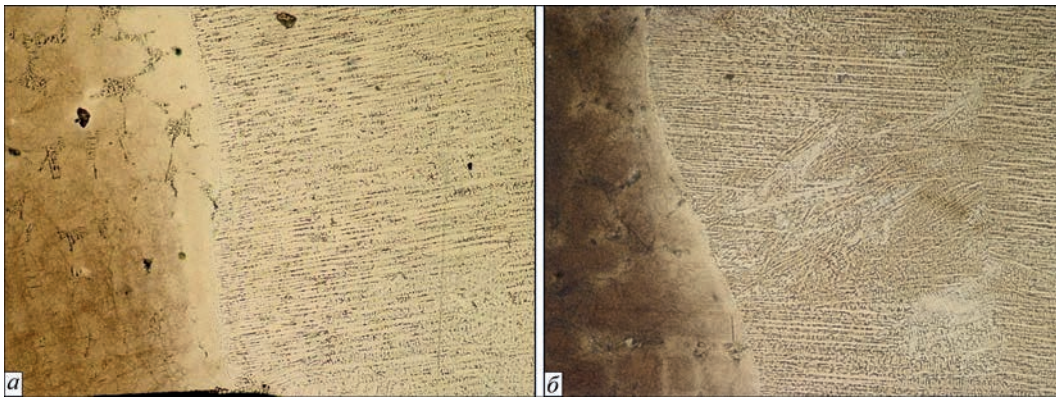


Рис. 6. Мікроструктура ($\times 100$) ділянки шва ЖНС в районі прямолінійної зони сплавлення (а) та локальної зміни її геометрії (б) му та визначається умовами високоградієнтного вирощування вихідного монокристалу.

Метал зони термічного впливу (ЗТВ) зберігає вихідну кристалографічну орієнтацію. Однак має місце зміна по мірі наближення до лінії сплавлення морфології та розмірів, розподілу основної зміцнюючої складової сплаву γ - γ' -фази, про що детально йшлося у роботі [17]. В мікроструктурі металу ЗТВ зразка з сприятливою кристалографічною орієнтацією спостерігається формування до 10 % розсіяних дрібнодисперсних до 10 мкм зерен орієнтації [111] для вихідної орієнтації [101] (рис. 4, а), та вихідної орієнтації [101] для [001] (рис. 4, б) відповідно, що може свідчити про їх деформаційну природу. Про деформаційну природу виявлених зерен, окрім певної кристалографічної орієнтації, свідчить їх морфологія, розмір та результати комплексного аналізу карт орієнтувань і мікронапружень, а також місце розташування у зварному з'єднанні. Кількість зерен, як і їх орієнтація, корелює зі ступенем відхилення вихідної кристалографічної орієнтації від напрямку високої симетрії. Слід зауважити, що вони не були виявлені металографічним методом.

При невідповідності кристалографічної орієнтації зварного з'єднання високій симетрії (рис. 5) кількість зерен орієнтації [111] в ЗТВ зростає до 20 % при вираженій тенденції до їх концентрації.

Зона лінії сплавлення являє собою перехідну ділянку від ЗТВ до зони епітаксіального росту металу шва. Її структура характеризується наявністю частково оплавлених дендритів та міждендритних проміжків [17]. Частково оплавлені дендрити приймають форму чарунок, зміна кристалографічної орієнтації при цьому малопомітна. При невідповідності кристалографічної орієнтації зварного з'єднання високій симетрії (рис. 5) зона характеризується дрібнозеренною структурою (5...40 мкм) з превалюванням кристалографічної орієнтації, яка відповідає вихідній та орієнтації зерен деформаційного типу.

Зона епітаксіального росту з самого початку досліджень визначалась як ділянка, яка в металографічному уявленні складається з паралельно

розміщених ортогонально ліній сплавлення дрібних дендритів [17]. У випадку кристалографічно симетричного зварного з'єднання структура її вказує на збереження вихідної кристалографічної орієнтації та наявність поодиноких дрібних (5...40 мкм) зерен орієнтації [111] (рис. 4, а) чи [101] (рис. 4, б). При невідповідності кристалографічній орієнтації зварного з'єднання чи ділянки шва високій симетрії (рис. 5, а) зона характеризується дрібнозеренною структурою (40...70 мкм).

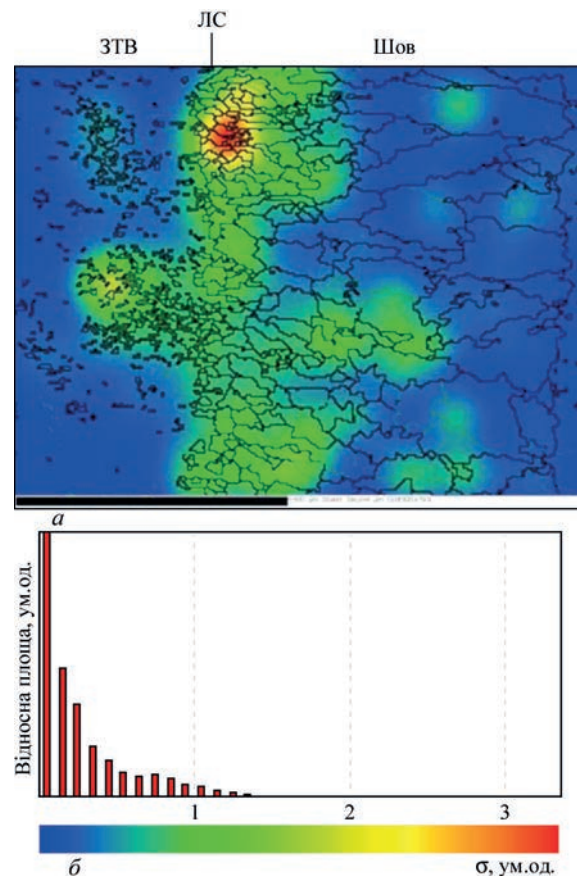


Рис. 7. Карта мікронапружень (а) зони сплавлення зварного шва ЖНС зразка з поверхнею близькою до (101) та частотна гістограма (б) при невідповідності ділянки шва кристалографічним умовам спрямованої кристалізації. ЗТВ – зона термічного впливу, ЛС – лінія сплавлення

В структурі металу шва для зразків із сприятливою кристалографічною орієнтацією, по мірі наближення до осі, можливе деяке збільшення розміру поодиноких зерен (рис. 4, *a, б*) зі збереженням орієнтації основного металу.

Для зразка з невідповідною кристалографічною орієнтацією зварного з'єднання високої симетрії, по мірі наближення до осі як в металографічному, так і в поданні EBSD-аналізу структура зерен набуває крупнозеренного, різномірного (до 300 мкм) переважно орієнтованого ортогонально фронту кристалізації зварювальної ванни. Окрім зростання розміру зерен явно виражене порушення монокристалічності. На прямих полюсних фігурах спостерігається поява нових рефлексів, зміщення та розмиття основних; на зворотніх – зменшення інтенсивності та акцентів рефлексів (рис. 5). Максимальне зростання розміру та дефектності структури, відхилення орієнтації від вихідної спостерігається в районі осі шва (рис. 5), де внаслідок локальної зміни кривизни макрофронту кристалізації зварювальної ванни має місце порушення основної умови спрямованої кристалізації – співвідношення напрямку росту кристалу з орієнтацією [001]. Саме на цій ділянці частіше всього спостерігається утворення гарячих тріщин

та руйнування з'єднання при високотемпературних випробуваннях [7, 10, 11, 16]. Подібна картина спостерігалась також в місцях локальних змін геометрії швів (рис. 6) внаслідок різних технологічних збурень, флуктуацій зварювальної ванни навіть при кристалографічно-симетричному зварному з'єднанні (рис. 4, *a, б*).

Слід зазначити, що навколо формувань поздовжніх кристалізаційних зерен спостерігається утворення високої концентрації дрібнодисперсних зерен деформаційної природи орієнтації [111] для вихідної [101] (рис. 4, *a*).

Скупчення дрібнозернистих зерен різної кристалографічної орієнтації, яке частіше спостерігається в зоні лінії сплавлення, призводить до концентрації мікронапружень (рис. 7), що негативно впливає на працездатність з'єднання в цілому.

Зіставлення результатів EBSD-аналізу та металографічних досліджень [9, 14, 17] свідчить про природу зерен іншої орієнтації, які можуть утворюватись при зварюванні монокристалів ЖНС – кристалізаційну та деформаційну. Граніці кристалізаційних зерен виникають в процесі кристалізації металу при стикуванні різної орієнтації блоків дендритів шва, деформацій-

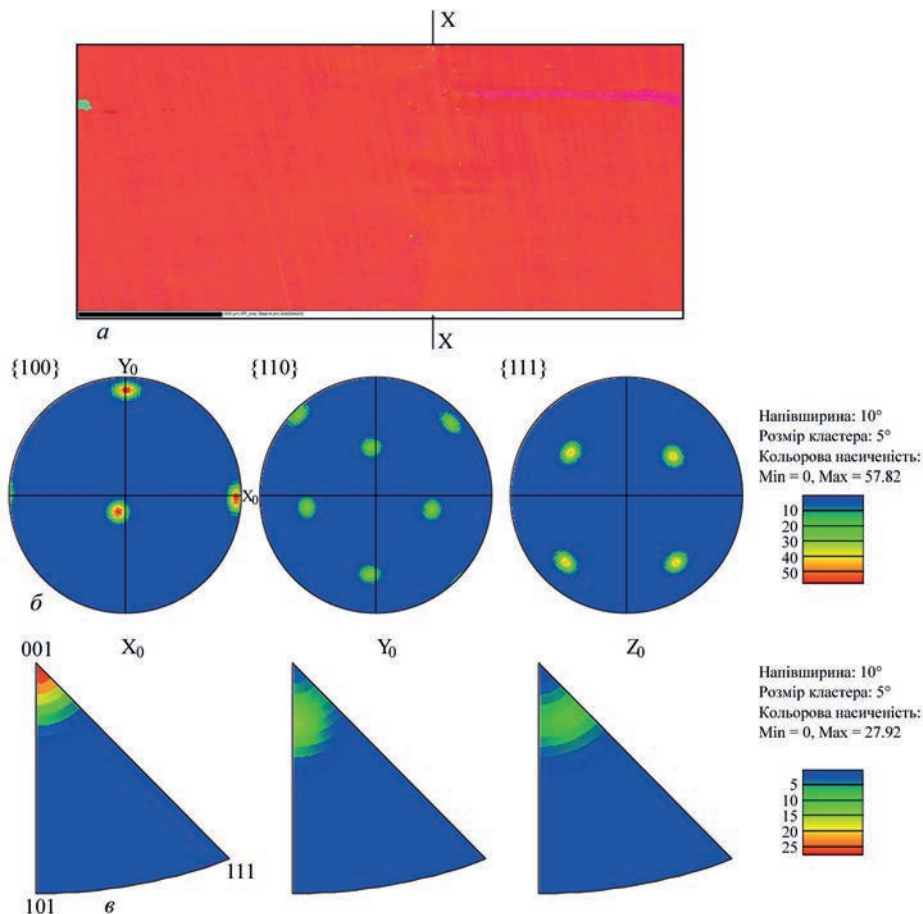


Рис. 8. Карти орієнтувань (*a*) центральної частини зварного шва монокристалічного ЖНС з поверхнею зразка (001), прямі (*б*) та зворотні (*в*) полюсні фігури при відповідності умовам спрямованої кристалізації. КГО-легенда до карти орієнтувань (див. рис. 4, *в*), X-X' – вісь шва

них – в результаті релаксації напружень при його остиганні по механізму, скоріш всього, полігонізації та динамічної рекристалізації. Границі деформаційних зерен можуть проходити як по міждендритним проміжкам, так і по тілу дендриту в залежності від взаємної орієнтації діючих напружень та дендритів. Причому розміри, морфологія та орієнтація деформаційних зерен корегують з відповідними параметрами кристалізаційних зерен та дендритів.

З огляду на різну природу розглянутих зерен, не дивлячись на деяку подібність їх параметрів, технологічні шляхи попередження утворення вказаних зерен будуть різні, однак, геометрія фронту кристалізації зварювальної ванни та кристалографічна орієнтація лінії з'єднання має превалююче значення.

Також слід відзначити, що при однакових температурних умовах виконання зварних з'єднань кількісні та розмірно-орієнтаційні параметри деформаційної структури металу зони термічного впливу мають певну кореляцію з аналогічними параметрами елементів структури шва. Встановлені залежності можуть свідчити про вплив кристалізаційної структури металу шва на характер розподілу деформації, в тому числі і в ЗТВ, на стадії охолодження зварного з'єднання.

Слід наголосити, що при сприятливих вихідних кристалографічних умовах завдяки формуванню відповідної геометрії зварювальної ванни та технологічного забезпечення величини температурно-часових параметрів [8, 16, 18] на фронті твердіння умовам спрямованої кристалізації, можливе отримання зварних швів задовільної досконалості монокристалічної структури (рис. 3, 8).

По результатам виконаних досліджень з застосуванням EBSD-аналізу при вивченні еволюції структури зварних з'єднань монокристалів ЖНС, очевидна необхідність проведення робіт щодо регламентації розмірів, морфології, розорієнтації, кількості та характеру розподілу структурних складових і розширення технологічних методів управління.

Висновки

1. Одним із основних факторів, які визначають особливості формування структури при зварюванні монокристалів ЖНС, є не тільки вихідна кристалографічна орієнтація зварного з'єднання, а і її зміна по фронті твердіння зварювальної ванни.

2. Методами EBSD-аналізу та оптичної мікроскопії показано, що відхилення вихідної кристалографічної орієнтації зварних з'єднань монокристалічних ЖНС завтовшки 2,0 мм більше ніж на 5° та фронту твердіння зварювальної ванни – понад 15° від напрямку переважного росту кри-

сталу $\langle 001 \rangle$ призводить до порушення епітаксіального наслідування вихідної орієнтації металом шва та формування зерен іншої орієнтації.

3. Для отримання регламентної досконалості монокристалічної структури зварних з'єднань необхідно, окрім дотримання основних умов спрямованої кристалізації (температурно-часових, кристалографічно-орієнтаційних) забезпечити обмеження локальних змін геометрії зварювальної ванни, яке визначається конструкцією з'єднання, умовами експлуатації, режимами та схемою зварювання.

4. Невиконання кристалографічно-орієнтаційних та температурно-часових умов формування досконалої монокристалічної структури металу шва призводить до утворення зеренної структури кристалізаційного та деформаційного походження (природи), різної морфології та розмірів. Слідом за вузькою зоною, завширшки 100...150 мкм, дрібно розмірних рівновісних зерен (до 40...70 мкм) біля лінії сплавлення має місце, по мірі наближення до осі шва трансформація структури в спрямовану крупнозеренну (40...300 мкм), що пов'язано зі зміною температурно-часових та кристалографічно-орієнтаційних умов кристалізації по перерізу з'єднання. Спостерігається кореляція параметрів вторинної (кінцевої) та кристалізаційної (первинної) структури. Скупчення дрібно розмірних зерен, особливо в зоні лінії сплавлення, сприяє до концентрації мікронапружень.

5. Показано, що при однакових температурних параметрах виконання зварних з'єднань в ЗТВ має місце формування зерен деформаційного типу. В залежності від орієнтаційних умов: до 10 % – при сприятливих, до 20 % – при несприятливих, що може бути пояснено різною схильністю до локалізації деформації металу.

6. Критичними вважаються наступні елементи структури:

- поперечні витягнуті зерна різної кристалографічної орієнтації в центральній частині шва, границі яких слугують осередком утворення тріщини в процесі зварювання;

- концентрація дрібнодисперсних різноорієнтованих зерен, особливо біля лінії сплавлення, по яких проходить локалізація напружень і деформацій, що підвищує схильність до руйнування при високотемпературних механічних навантаженнях, зниженню працездатності зварної конструкції.

7. Результати проведених досліджень дають більш чітке уявлення про формування структури і її еволюцію в залежності від технологічних факторів процесу зварювання та вказують на можливість створення промислових зварних конструкцій із монокристалів ЖНС.

Список літератури/References

1. Логунов А.В., Буров М.Н., Данилов Д.В. (2016) *Двигатель*, 1, 10.
Logunov, A.V., Burov, M.N., Danilov, D.V. (2016) Development of power and marine engine construction in the world (Review). *Dvigatel*, 1, 10-13 [in Russian].
2. Tsukagoshi, K., Muyama, A., Masada, J. et al. (2007) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, 44(4), 1.
2. Tsukagoshi K., Muyama A., Masada J. et al. (2007) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. *Technical Review*, 44, 4, 1.
3. XF9-1, the World's Best Standards Fighter Engine, Has Been Completed – Japan's Military Technology, Interview with the Developer, *BLOGOS*, Part 1/2 (2019) (in Japanese).
4. Hino, T., Kobayashi, T., Koizumi, Y. et al. (2000) Superalloys (Eds. T.M. Pollock, R.D. Kissinger, R.R. Bowman, K.A. Green, M. McLean, S. Olson, and J.J. Schirm) (TMS: 2000).
5. Koizumi, Y., Kobayashi, T., Yokokawa, T. et al. (1998) *Cost Conf. Liege*, part 2: 1089.
6. Langston, L.S. (2014) *Global Gas Turbine News*, 9, 76.
7. Park, J.W., Vitec, J.M., Babu, S.S., David, S.A. (2004) Stray grain formation, thermomechanical stress and solidification cracking single crystal nickel base superalloy welds. *Science and technology of welding and Joining*, 9 (6), 472–482. DOI: 10.1179/136217104252021841
8. Ющенко К.А., Гах И.С. Задерий Б.А. и др. (2013) Влияние геометрии сварочной ванны на структуру металла швов монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 5, 46–51.
Yushchenko, K.A., Gakh, I.S., Zaderiy, B.A. et al. (2013) Influence of weld pool geometry on structure of metal of welds on high-temperature nickel alloy single crystals. *The Paton Welding J.*, 5, 45-50.
9. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Карасевская О.П. и др. (2009) О возможности наследования монокристаллической структуры сложнелегированных никелевых сплавов в неравновесных условиях сварки плавлением. *Металлофизика и новейшие технологии*, 31, 4, 473–485.
Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.A., Karasevskaya, O.P. et al. (2009) On possibility of inheritance of single crystal structure of complex nickel alloys in nonequilibrium conditions of fusion welding. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, 31(4), 473–485 [in Russian].
10. Anderson, T.D., Du Pont, J.N. (2011) Stray grain formation and solidification cracking susceptibility of single crystal Ni base superalloy CMSX-4. *Welding Journal*, 2, 27–31.
11. Карасевська О.П., Ющенко К.А., Задерий Б.О. та ін. (2021) Деформація та руйнування монокристалів жароміцних нікелевих стопів зі зварними з'єднаннями під час випробувань на розтяг. *Металофізика. Новітні технол.*, 43, 7, 939–957.
Karasevska, O.P., Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.O. et al. (2021) Deformation and fracture of single crystals of high-strength nickel alloys with welded joints during tensile testing. *Metalofizyka. Novitni Tekhnol.*, 43(7), 939–957 [in Ukrainian].
12. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Епшин А.И. (2005) Влияние кристаллографической ориентации на прочностные характеристики монокристаллов никелевого жаропрочного сплава. *Научные труды МАТИ*. Вып. 8 (80). Москва, ИЦМАТИ, с. 22–27.
Golubovsky, E.P., Svetlov, I.L., Epishin, A.I. (2005) Influence of crystal-lattice orientation on strength characteristics of single crystals of high-temperature nickel alloy. *Nauchnye Trudy MATI*, Issue 8 (80). Moscow, ITsMATI, 22-27 [in Russian].
13. Шварц А., Кумар М., Адамс Б. и др. (2004) Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении. Москва, Техносфера.
Shvarts, A., Kumar, M., Adams, B. et al. (2004) Diffraction method of reflected electrons. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].
14. Варюхин В.Н., Пашинская Е.Г., Завдовеев А.В. и др. (2014) Возможности метода дифракции обратнорассеянных электронов для анализа структуры деформированных материалов. Київ, Наукова думка, 2014.
Varyukhin, V.N., Pashinskaya, E.G., Zavdoveev, A.V. et al. (2014) Possibilities of diffraction method of back scattered electrons for analysis of structure of wrought materials. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
15. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. (1997) Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. Москва, Машиностроение.
Shalin, R.E., Svetlov, I.L., Kachanov, E.B. et al. (1997) *Single crystals of high-temperature nickel alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
16. Гах І.С. (2011) Фізико-технологічні особливості електронно-променевого зварювання високонікелевих жароміцних сплавів з монокристалічною структурою: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ.
Gakh, I.S. (2011) *Physical-technological features of electron beam welding of high-nickel high-strength alloys with single crystal structure*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv [in Ukrainian].
17. Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.A., Gakh I.S. et al. (2021) Features of the Microstructure of Welded Joints of Single Crystals of Heat-Resistant Nickel Alloys. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, 9, 1175–1193.
18. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2016) Формирование структуры металла шва при ЭЛС монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 8, 21–28.
Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.A., Gakh I.S. et al. (2016) Formation of weld metal structure in electron beam welding of single crystals of high-temperature nickel alloys. *The Paton Welding J.*, 8, 15-22.

CRYSTALLOGRAPHIC AND DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF STRUCTURE ELEMENTS IN WELDS OF HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY SINGLE CRYSTALS

I.S. Gakh, B.O. Zaderiy, G.V. Zviagintseva, A.V. Zavdoveyev, Yu.V. Oliinyk

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

E-mail: gakh@paton.kiev.ua

Crystallographic-orientational and dimensional-morphological features of microstructure in welded joints of high-temperature nickel alloy single crystals are considered, depending on the initial crystallographic orientation and its change over the weld solidification macrofront. EBSD analysis and optical metallography methods were used to study the structural features of individual zones of welded joints of high-temperature nickel alloy single crystals. Their dependence on the initial crystallographic orientation of the welded joint and its change over the weld pool solidification macrofront is established. It is shown that alongside the predominant inheritance of base metal crystallographic orientation by the weld metal, formation of a grain structure of different crystallographic orientation, morphology, dimensions and nature, namely solidification and deformation-induced, can be in place. The mechanisms of formation of grains of the specified nature are considered. Boundaries of solidification type grains are the junction of dendrite blocks with different crystallographic orientation. Deformation type grains are the result of relaxation of microstresses at the stage of welded joint cooling, and they form in areas where the direction of acting stresses is the closest to the crystallographic orientation of easy slip. It was also found that deformation type grains can form both in the weld metal, and in the HAZ. At the same temperature conditions of making the welded joints, the quantitative and dimensional-orientational parameters of deformation structure of the HAZ metal correlate with similar parameters of weld structure elements. The possibility to produce welds without cracks with perfect single crystal structure is indicated. 18 Ref., 8 Fig.

Keywords: single crystals, high-temperature nickel alloys, welded joints, EBSD-analysis, crystallographic orientation, structure parameters, grain nature, weld pool, solidification macrofront

Надійшла до редакції 14.06.2023

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 06Г2БДП

С.Л. Жданов, В.Д. Позняков, А.В. Завдовєєв, А.М. Герасименко, О.Г. Синєок,
А.О. Максименко

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

Забезпечення надійної експлуатації металокопункцій мостів вимагає вирішення широкого кола питань, зокрема, розроблення нових вітчизняних матеріалів з гарантованими характеристиками, які б забезпечували необхідну довговічність мостових споруд. Сучасним вимогам до матеріалів для будівельних металокопункцій і мостів відповідають високоміцні економно-леговані сталі 06ГБ, 06Г2Б, на базі яких створена сталь з підвищеною стійкістю до атмосферної корозії марки 06Г2БДП класу міцності 355...500 МПа. Використання корозійностійкої сталі при виготовленні металокопункцій мостів дозволить підвищити їх надійність та експлуатаційний ресурс. У роботі розглянуті питання впливу технологічних параметрів зварювання на структуру та властивості зварних з'єднань сталі 06Г2БДП. Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: металокопункції мостів, корозійностійка сталь, структура, зварні з'єднання, зварювальні матеріали, механічні властивості

Вступ. У даний час при виготовленні металокопункцій мостів існує потреба у високоміцних листових сталях з високими механічними властивостями і підвищеною стійкістю до атмосферної корозії [1–3]. Про це свідчать результати обстеження стану таких металокопункцій зі сталезалізобетонною проїзною частиною, сталевими головними та поперечними балками. Вони показали, що основним видом їх пошкодження є зменшення перерізу поясів та стінок балок внаслідок корозії, що істотно знижує несучу здатність копункцій та експлуатаційну придатність мостів [4–7]. Поєднання конструктивних та технологічних факторів, а також застосування у мостах більш раннього спорудження звичайних будівельних сталей, які мають відносно низьку стійкість до корозії, сприяють прискореному розвитку цього процесу [8]. Застосування в металокопункціях прогонових будов мостів сталей підвищеної корозійної стійкості важливо з точки зору подовження ресурсу їх працездатності, зниження експлуатаційних витрат.

На даний час в Україні в будівництво відповідальних зварних металокопункцій впроваджені нові економно-леговані сталі марок 06ГБ, 06Г2Б [9]. Ці сталі мають підвищену міцність та холодостійкість і за цими показниками вигідно відрізняються від сталей 09Г2С, 10ХСНД, що зазвичай застосовуються при виготовленні вітчизняних металокопункцій. Натомість, щоб підвищити стійкість сталі 06Г2Б до корозії на її базі створена нова сталь марки 06Г2БДП [10], яка містить 0,04...0,12 % вуглецю залежно від класу міцності, марганцю 0,90...1,75 %, міді 0,30...0,45 %, сірки

≤ 0,012 %. Збільшений вміст фосфору, особливо в контакт з міддю, дає змогу підвищити корозійну стійкість, але може погіршувати деформаційні властивості металу та викликати його холодноламкість, тому вміст фосфору в сталі обмежено до 0,05 % (табл. 1). Поєднання високої міцності і високої ударної в'язкості сталі 06Г2БДП (табл. 2) отримано за допомогою модифікуючої обробки та термопокрощення.

За результатами дослідження статичної міцності, пластичності, ударної в'язкості та корозійної стійкості показано, що сталь 06Г2БДП перспективна з точки зору використання для будівництва мостів та інших відповідальних копункцій [11].

Методики досліджень. Для забезпечення надійної роботи копункції метал зварного з'єднання, включаючи шов і зону термічного впливу (ЗТВ), повинен мати достатню міцність та холодостійкість. Ці показники визначаються, з одного боку, хімічним складом, термообробкою і товщиною металу, що зварюється, а з іншого – умовами зварювання: погонною енергією, підігрівом, технікою виконання з'єднань тощо. Цьому аналізу і присвячена дана робота.

З метою подальшого створення технологій дугового зварювання для виготовлення металокопункцій прогонових будов мостів та інженерних споруд із сталі 06Г2БДП проведені дослідження з використанням сучасних методів світлової та електронної металографії, фізичних випробувань щодо вивчення впливу технологічних процесів дугового зварювання на формування структури, механічні властивості та холодостій-

Жданов С.Л. – <https://orcid.org/0003-3570-895X>, Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>,

Завдовєєв А.В. – <https://orcid.org/0003-2811-0765>

© С.Л. Жданов, В.Д. Позняков, А.В. Завдовєєв, А.М. Герасименко, О.Г. Синєок, А.О. Максименко, 2023

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних сталей, мас. %

Прокат/плавка	Товщина, мм	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Nb	Ti
06Г2БДП дослідна плавка	13	0,068	1,36	0,082	0,053	0,011	0,30	0,14	0,15	0,47	0,018	0,056	0,004
06Г2БДП ТУ У27-05416823-078:2006	8...50	0,04-0,08	1,10-1,40	0,15-0,35	0,030-0,050	0,012	до 0,30	до 0,30	0,02-0,05	0,30-0,45	0,02-0,05	0,010-0,030	до 0,020
06Г2Б		0,08	1,3	0,25	0,025	0,01	–	–	0,1	0,3	0,02	–	–
10ХСНД		≤0,12	0,8	0,8	0,03	0,035	0,6	0,5	–	0,4	–	–	–

Таблиця 2. Механічні властивості сталей*

Марка сталі/клас міцності	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ_3 , %	KCV ⁻²⁰	KCV ⁻⁴⁰
06Г2Б С390	390	490	22	–	98
06Г2БДП С390	390	490	22	68	49
10ХСНД С390	390	530...685	19	–	29
06Г2БДП дослідна плавка	529...534	645...666	24,7...27,3	298...310	230...298

кість металу ЗТВ. Для цього були відібрані порошковий дріт та дріт суцільного перерізу для механізованого зварювання в захисних газах і дріт суцільного перерізу для автоматичного зварювання під шаром флюсу

Для проведення досліджень із сталі 06Г2БДП завтовшки 13 мм були виготовлені стикові з'єднання з V-подібним розкриттям крайок. Механізоване зварювання в суміші газів 82% Ar + 18% CO₂ виконували дротом суцільного перерізу NiMo1-IG діаметром 1,2 мм (фірми Böhler Thyssen) та в CO₂ порошковим дротом Filarc PZ 6114S, 1,2 мм (фірма ESAB). Режими зварювання для обох варіантів були практично однакові і склали: $I_{зв} = 190...220$ А, $U_d = 26...28$ В, $V_{зв} = 14...16$ м/год, витрати захисного газу (суміші) – 15...18 л/хв. Автоматичне зварювання під шаром керамічного флюсу ОК Flux 10.71 (фірма ESAB) виконували дротом суцільного перерізу Св-10НМА діаметром 4 мм на режимі: $I_{зв} = 520...530$ А, $U_d = 32$ В, $V_{зв} = 28$ м/год.

Результати роботи та їх обговорення. Для виготовлення будівельних металевих конструкцій зазвичай використовується механізоване в захисних газах та автоматичне під шаром флюсу дугове зварювання. На монтажі конструкцій, частіше за все, зварювання виконується ручним дуговим способом з використанням покритих електродів.

Багаторічний досвід показав, що механізоване дугове зварювання в захисних газах конструкційних сталей класу міцності С390 виконується дротом суцільного перерізу Св-08Г2С, а автоматичне – під шаром флюсу АН-348 або АН-47 дротами марок Св-08ГА або Св-10НМА, ручне дугове – електродами марки УОНИ-13/55.

Щодо зварювання сталей класу міцності С500 і вище, до яких відноситься сталь 06Г2БДП, чітких рекомендацій у нормативних документах з мостобудування по вибору матеріалів для їх зварювання

немає. Тому однією з головних задач даної роботи було обґрунтування використання того чи іншого матеріалу для зварювання металу зазначеного вище класу міцності. Отримані дані механічних властивостей металу швів свідчать (рис. 1), що показники статичної міцності і пластичності металу

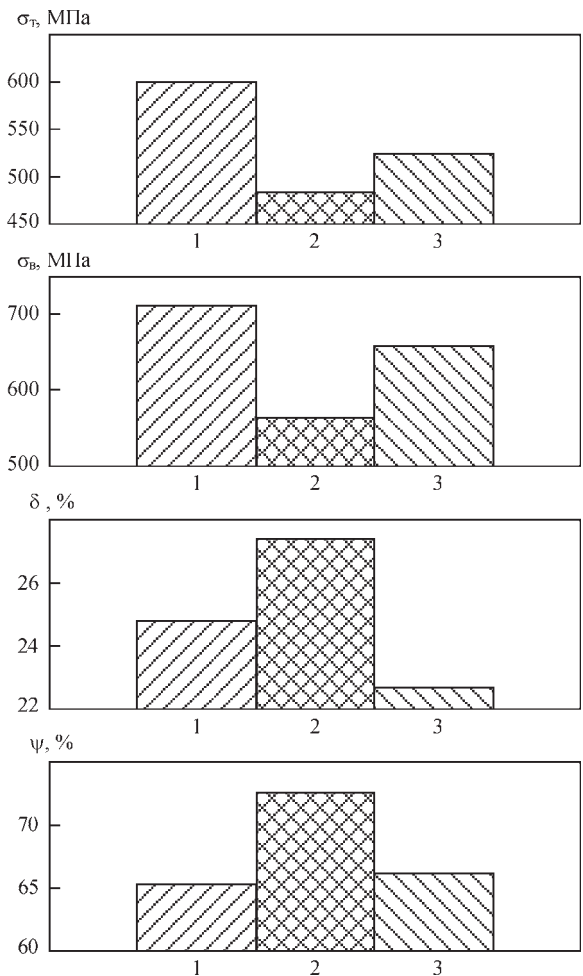


Рис. 1. Показники границі текучості і міцності, відносного подовження, відносного звуження металу швів зварних з'єднань сталі 06Г2БДП, виконаних: дротом суцільного перерізу NiMo1-IG в суміші газів 82%Ar + 18% CO₂ (1), порошковим дротом FilarcPZ 6114S в CO₂(2) та дротом суцільного перерізу Св-10НМА під шаром флюсу ОК Flux 10.71 (3)

*В оцінці механічних властивостей взяв участь В.Д. Рябокөн

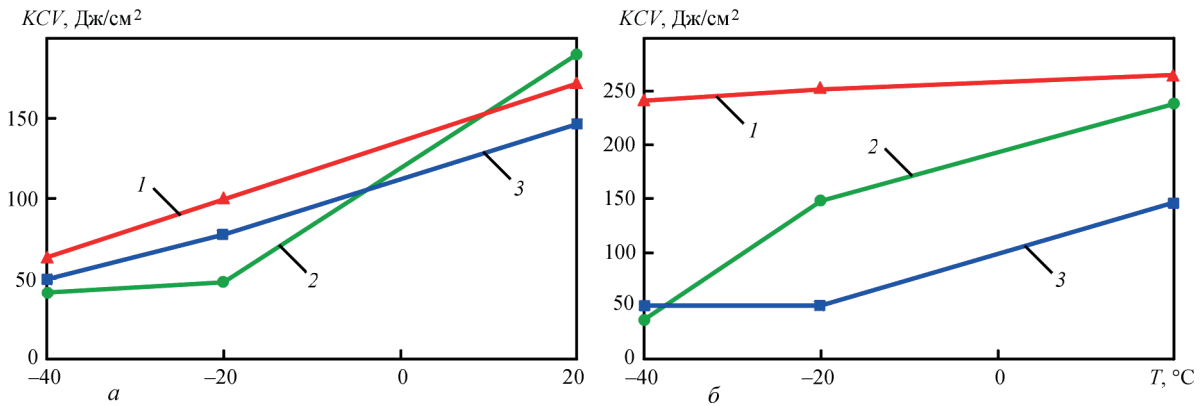


Рис. 2. Ударна в'язкість металу швів (а) та металу ЗТВ (б) зварних з'єднань сталі 06Г2БДП: 1 – дріт NiMo1-IG, 82%Ar + 18% CO₂; 2 – порошковий дріт FilarcPZ 6114S, CO₂; 3 – дріт Св-10НМА, флюс ОК Flux 10.71

швів як при механізованому зварюванні в захисних газах, так і при автоматичному під флюсом суттєво перевищують аналогічні показники основного металу сталі 06Г2БДП класу міцності С390.

Дріт суцільного перерізу NiMo1-IG в сполучі із захисною газовою сумішшю 82% Ar + 18% CO₂ та Св-10НМА під шаром керамічного флюсу ОК Flux 10.71 забезпечують рівномірність та на 15...20 % перевищують показники σ_T і σ_B основного металу сталі 06Г2БДП класу міцності С500. На достатньо високому рівні знаходяться і показники пластичності, які перевищують нормативні дані для сталі.

За показниками статичної міцності і пластичності способи зварювання та зварювальні матеріали, які рекомендуються, забезпечують необхідний рівень механічних властивостей металу швів і можуть бути застосовані для виготовлення металоконструкцій зі сталі 06Г2БДП класу міцності С390, а за винятком порошкового дроту Filarc PZ 6114S можуть використовуватися для зварювання сталей класу міцності С500.

Отримані результати досліджень ударної в'язкості (рис. 2) свідчать, що нормативним значенням ($KCV^{20} \geq 68$ Дж/см² і $KCV^{40} \geq 49$ Дж/см²) відповідають шви, що виконували дротом суцільного перерізу NiMo1-IG в суміші газів 82% Ar + 18% CO₂ та Св-10НМА під шаром флюсу ОК Flux 10.71. Зокрема при зварюванні дротом NiMo1-IG у суміші газів значення KCV металу швів та ЗТВ перевищують ударну в'язкість основного металу в 1,5...2,0 рази та в 3,0...3,5 рази відповідно.

Високі значення ударної в'язкості підтверджуються фрактографічними дослідженнями зламів зразків після випробувань. Так, при випробуваннях зразків з надрізом по центру шва характер руйнування при температурі -40 °C у вершині надрізу та в зоні доламу в'язкий з розміром ямок $d_{я} = 0,4...5$ мкм, тільки в зоні розповсюдження магистральної тріщини – квазікрихкий (рис. 3). За таких же температурних умов в зразках з надрізом по ЗТВ в усіх зонах характер руйнування – 100 %

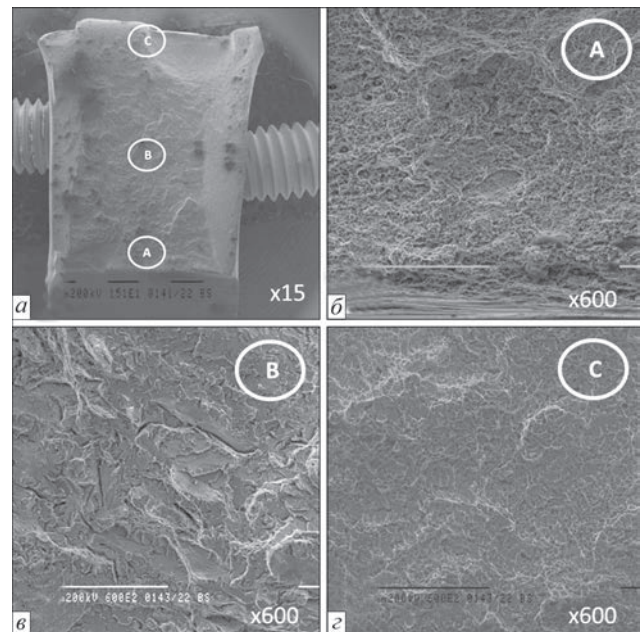


Рис. 3. Зовнішній вигляд злам зразка (а) після випробувань на ударний згин ($T_{вип} = -40$ °C) металу шва зварного з'єднання сталі 06Г2БДП, виконаного дротом суцільного перерізу NiMo1-IG у суміші газів 82% Ar + 18% CO₂: А – ділянка у вершині надрізу; В – ділянка розповсюдження магистральної тріщини; С – ділянка доламу; б – фрактограма ділянки «А»; в – фрактограма ділянки «В»; г – фрактограма ділянки «С»

в'язкий з великим скупченням невеликих ямок розміром $d_{я} = 1...5$ мкм (рис. 4).

Натомість використання порошкового дроту Filarc PZ 6114S дозволяє забезпечити ударну в'язкість металу швів та ЗТВ зварних з'єднань на необхідному рівні тільки при температурі випробувань 20 °C. При зниженні температури випробувань до -20 та -40 °C показники KCV зменшуються, а в металі шва мають значення навіть нижчі за нормативні.

Про це також свідчать результати фрактографічних досліджень при аналогічних температурах зламів зразків з надрізом як по центру шва, так і по ЗТВ. У вершині надрізу та в зоні доламу для температури -40 °C в металі шва спостерігається в'язкий характер руйнування з розміром ямок $d_{я} = 0,5...4$ мкм (рис. 5, б), а в зоні розповсюджен-

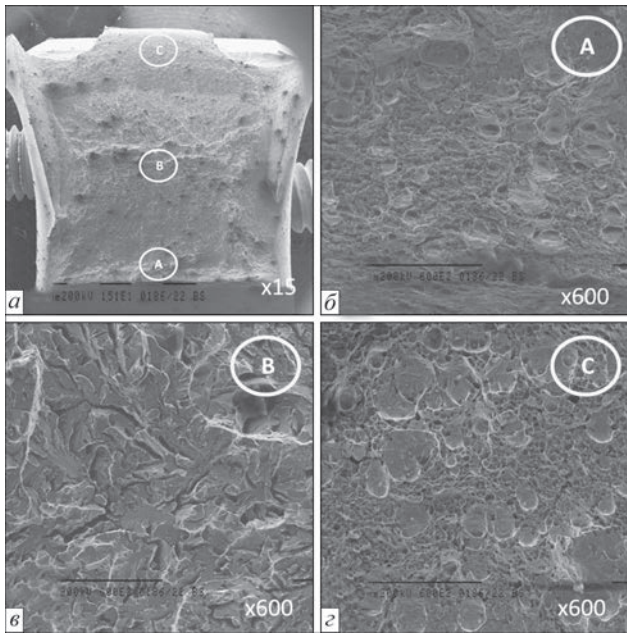


Рис. 4. Зовнішній вигляд зламу зразка (а) після випробувань на ударний згин ($T_{\text{вип}} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$) металу ЗТВ зварного з'єднання сталі 06Г2БДП, виконаного дротом суцільного перерізу NiMo1-IG у суміші газів 82%Ar + 18% CO₂; А – ділянка у верхині надрізу; В – ділянка розповсюдження магістральної тріщини; С – ділянка доламу; б – фрактограма ділянки «А»; в – фрактограма ділянки «В»; г – фрактограма ділянки «С»

ня магістральної тріщини превалює крихке руйнування з діаметром фасеток сколу 10...55 мкм. Приблизно така ж картина характерна для руйнування зразків з надрізом по ЗТВ при температурі випробувань $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Натомість при зниженні температури до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ квазікрихкий та крихкий характер руйнування спостерігається у вершині

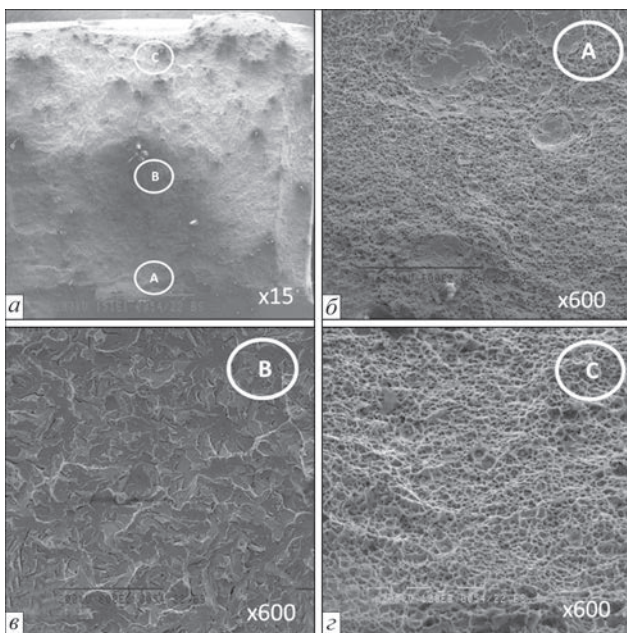


Рис.5. Структура верхнього шару шва при зварюванні стаціонарною дугою (а, б), при ІДЗ (в, г) та пульсуючою дугою (д, е): а, в, д – оптична мікроскопія при $\times 500$ (зменшено в 2 рази); б, г, е - СЕМ

ні надрізу і в зоні розповсюдження магістральної тріщини з розміром фасеток сколу $d_{\phi} = 8...30\text{ мкм}$ (рис. 6, в). І тільки в зоні доламу характер руйнування в'язкий з невеликим розміром ямок $d_{\text{я}} = 1...10\text{ мкм}$ (рис. 6, г).

За результатами фрактографічних досліджень встановлено, що для всіх досліджених варіантів зварювання при низьких температурах ударна в'язкість металу ЗТВ дещо більша, ніж металу швів, що забезпечується диспергуванням структурних складових. Максимальні значення ударної в'язкості при всіх температурах випробувань характерні для зварних з'єднань сталі 06Г2БДП, що виконували механізованим зварюванням дротом суцільного перерізу NiMo1-IG у суміші 82% Ar + 18% CO₂.

Зміна показників механічних властивостей і ударної в'язкості пов'язана із структурними перетвореннями в зонах зварного з'єднання, як в металі шва, так і металі ЗТВ.

У металі шва при механізованому зварюванні дротом суцільного перерізу формується найбільш дисперсна структура, що складається з феритно-карбідної суміші з рідкими, ледь помітними тонкими виділеннями доєвтектоїдного фериту по границях первинних зерен з підвищеною твердістю 2200 МПа (рис. 7, а). В ділянці перегріву зони термічного впливу формується тонкодисперсна структура голчастого фериту з неповним виділенням доєвтектоїдного фериту. Значення твердості для цієї ділянки дорівнює 2500 МПа (рис. 7, б).

При механізованому зварюванні порошковим дротом у металі шва формуються мікроструктура голчастого фериту з великою часткою грубих пластин доєвтектоїдного фериту, виділеного із пророслих всередину рівноспрямованих крупних видовжених феритних зерен з мікротвердістю

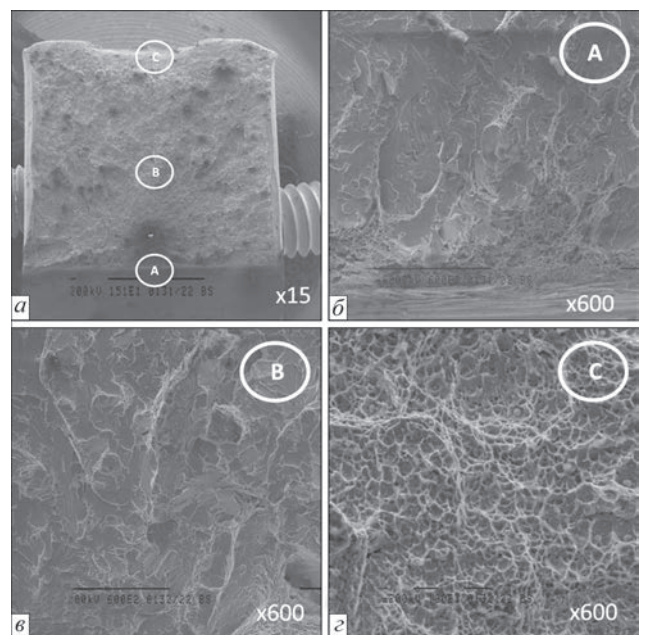


Рис.6. Макрошліфи проб Теккен сталі 13ХГМРБ, виконаних ІДЗ: а – без попереднього підігріву; б – ТП = 120 °С

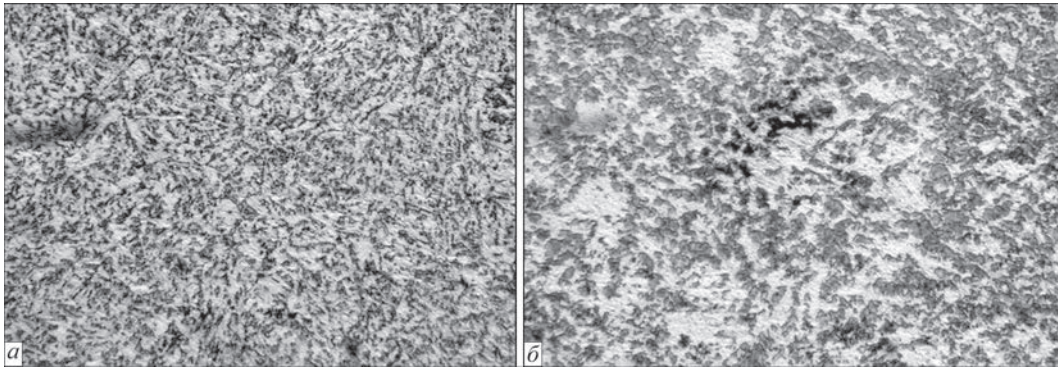


Рис. 7. Мікроструктура ($\times 500$) зварного з'єднання сталі 06Г2БДП, виконаного дротом суцільного перерізу NiMo1-IG в суміші газів 82% Ar + 18% CO₂: а – шов; б – ЗТВ

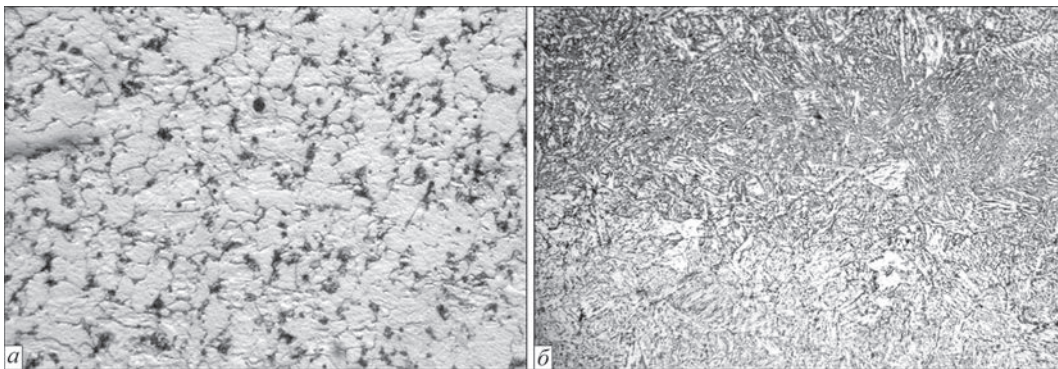


Рис. 8. Мікроструктура ($\times 500$) зварного з'єднання сталі 06Г2БДП, виконаного порошковим дротом FilarcPZ 6114S в CO₂: а – шов; б – ЗТВ

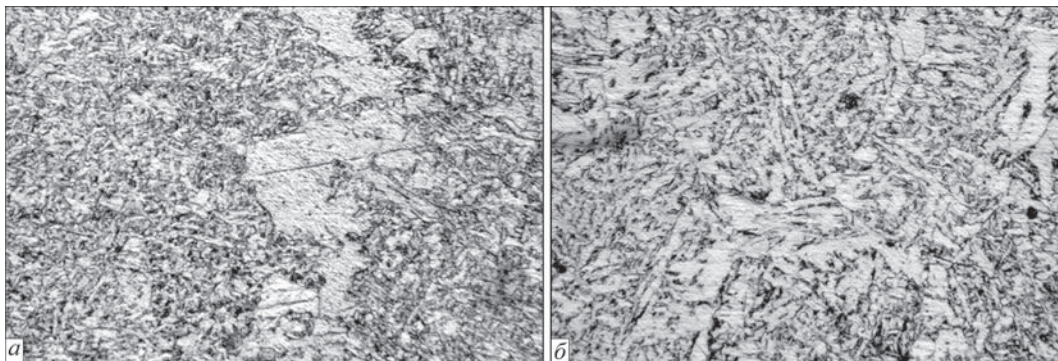


Рис. 9. Мікроструктура ($\times 500$) зварного з'єднання сталі 06Г2БДП, виконаного дротом суцільного перерізу Св-10НМА під шаром флюсу OK Flux 10.71: а – шов; б – ЗТВ

2110 МПа (рис. 8, а). В металі ЗТВ формується тонкодисперсна феритна структура з підвищенням твердості до 2450 МПа в ділянці перегріву та зниженням твердості до 2100 МПа в ділянці неповної перекристалізації (рис. 8, б).

У металі шва при автоматичному зварюванні під флюсом утворюється голчата феритна структура з найбільш розгалуженою сіткою яскраво вираженого доєвтектоїдного фериту по границям зерен фериту більш округлої форми. Структура шва має найнижчу мікротвердість – 2080 МПа. Твердість ділянки сплавлення 2000 МПа (рис. 9, а). В ділянці перегріву ЗТВ формується голчата феритна структура з грубими пластинами доєвтектоїдного фериту та ділянками фериту по Відманштетту з твердістю 2050...2080 МПа (рис. 9, б).

Також при автоматичному зварюванні під флюсом в зварному з'єднанні формується ділянка відпуску шириною 6 мм на відстані 5 мм від лінії сплавлення зі значним зниженням твердості до 1600...1800 МПа та утворенням дрібнозернистої феритно-перлітної структури.

Із вказаних сполучень зварювальних матеріалів з точки зору формування дисперсної феритно-карбідної структури та отримання високих показників ударної в'язкості найбільш сприятливим є використання дроту суцільного перерізу фірми Böhler NiMo1-IG при механізованому зварюванні сталі 06Г2БДП у суміші газів 82% Ar + 18% CO₂.

Висновки

Дослідженнями впливу способів дугового механізованого в захисних газах та автоматично-

го під шаром флюсу зварювання на механічні властивості і структуру зварних з'єднань сталі 06Г2БДП встановлено наступне:

– за показниками статичної міцності та пластичності зазначені способи зварювання та зварювальні матеріали: дріт суцільного перерізу Ni-Mo1-IG у сполученні з газовою сумішшю 82% Ar + 18% CO₂, порошковий дріт Filarc PZ 6114S разом з CO₂ та дріт суцільного перерізу Св-10НМА у сполученні з флюсом ОК Flux 10.71 забезпечують необхідний рівень механічних властивостей металу швів і можуть бути застосовані для виготовлення металоконструкцій із прокату 06Г2БДП класу міцності С390;

– натомість для зварювання металоконструкцій із сталі 06Г2БДП класу міцності С500 можуть бути застосовані наведені вище сполучення зварювальних матеріалів за винятком порошкового дроту Filarc PZ 6114S в CO₂;

– металографічні дослідження мікроструктури всіх зон зварних з'єднань та фактографічні дослідження поверхні зламів зразків після випробувань на ударний згин показали, що зі вищезазначених сполучень зварювальних матеріалів з точки зору формування дисперсної феритно-карбідної структури та отримання високих показників ударної в'язкості найбільш сприятливим може бути використання дроту суцільного перерізу фірми Böhler NiMo1-IG при механізованому зварюванні у суміші газів 82% Ar+18 %CO₂;

– використання технологічного процесу автоматичного зварювання під шаром флюсу доцільно при виготовленні металоконструкцій, які будуть працювати при температурах не нижче –20 °С, а для виробів, що зварюються порошковим дротом в CO₂ з точки зору отримання показників ударної в'язкості, вищих за нормативні, діапазон робочих температур повинен бути тільки позитивним (не нижче плюс 20 °С).

Список літератури/References

1. Miki, C., Homma, K., Tominaga, T. (2002) High strength and high performance steels and their use in bridge structures. *J. of constructional steel research*, 58 (1), 3–20.

2. Albrecht, P., Hall Jr, T.T. (2003) Atmospheric corrosion resistance of structural steels. *J. of materials in civil engineering*, 15 (1), 2–24.

3. Bjorhovde, R. (2004) Development and use of high performance steel. *J. of Constructional Steel Research*, 60 (3-5), 393–400.

4. Morcillo M., Diaz I., Cano H. et. al. (2019) Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part II: Testing, inspection, maintenance. *Construction and Building Materials* 222, 750–765. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.155>.

5. Шимановський О.В. (2020) *Нариси стосовно проблем позакласних мостів*. Київ, Сталь.

Shimanovskyi, O.V. (2020) *Essays on problems of nonconventional bridges*. Kyiv, Stal [in Ukrainian].

6. Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В. (2018) Міст ім. Є.О. Патона – нинішній стан та перспективи. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, 1, 2–9.

Shimanovskyi, O.V., Koklubey, D.O., Shalinskyi, V.V. (2018) E.O.Paton bridge – current state and prospects. *Promyslove Budivnytstvo ta Inzhenerni Sporudy*, 1, 2–9 [in Ukrainian].

7. Позняков В.Д., Дядін В.П., Давидов Є.О. (2021) Технічний стан металевих конструкцій головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, 1, 9–17.

Poznyakov, V.D., Dyadin, V.P., Davydov, Ye.O. (2021) Technical state of metal structures of main girders of E.O. Paton bridge across the Dnipro in Kyiv. *Promyslove Budivnytstvo ta Inzhenerni Sporudy*, 1, 9–17 [in Ukrainian].

8. Ковтуненко В.А., Герасименко А.М., Синеок А.Г. и др. (2005) Характерные повреждения сварных металлических конструкций мостов. *Автомат. сварка*, 10, 29–35.

Kovtunencko, V.A., Sineok, A.G., Gerasimenko, A.M. et al. (2005) Typical damages of welded metal structures of bridges. *The Paton Welding J.*, 10, 27–32.

9. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. и др. (2013) Свариваемость экономнолегированных сталей 06ГБД и 06Г2Б. *Автомат. сварка*, 4, 9–15.

Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Maksimenko, A.A. (2013) Weldability of sparsely-alloyed steels 06GBD and 06G2B. *The Paton Welding J.*, 4, 8-14.

10. Ковтуненко В.А., Герасименко А.М., Петрученко А.А. и др. (2007) Стальной прокат повышенной атмосферостойкости для сварных строительных конструкций. *Дороги і мости: Збірник наук. праць*, 7, 297–304.

Kovtunencko, V.A., Gerasimenko, A.M., Petruchenko, A.A. et al. (2007) Steel rolled stock of increased weather resistance for welded building structures. In: *Dorogy i Mosty, Zbirnyk Nauk. Prats*, 7, 297–304 [in Russian].

11. Завдоев А.В., Позняков В.Д., Жданов С.Л. та ін. (2020) Вплив термічних циклів зварювання на формування структури та властивостей корозійностійкої сталі 06Г2БДП. *Автомат. зварювання*, 9, 22–27.

Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L. et al. (2020) Impact of thermal cycles of welding on formation of the structure and properties of corrosion-resistant steel 06G2BDP. *The Paton Welding J.*, 9, 14-18.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF 06G2BDP STEEL

S.L. Zhdanov, V.D. Poznyakov, A.V. Zavdoveyev, A.M. Herasimenko,
O.G. Synyeok, A.O. Maksymenko,

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

Ensuring reliable operation of bridge metal structures requires solving a wide range of issues, in particular, development of new local materials with guaranteed characteristics, which would provide the required durability of bridge structures. Modern requirements to materials for building metal structures and bridges are met by high-strength sparsely-alloyed 06GB, 06G2B steels, which were the base for development of 06G2BDP grade steel of 355...500 MPa strength class with higher resistance to atmospheric corrosion. Application of the corrosion-resistant steel for fabrication of bridge metal structures will allow improvement of their reliability and service life. The work deals with the influence of welding technology parameters on the structure and properties of welded joints of 06G2BDP steel. 11 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: bridge metal structures, corrosion-resistant steel, structure, welded joints, welding consumables, mechanical properties

Надійшла до редакції 07.07.2023

ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ, ШИХТА ЯКОГО МІСТИТЬ ЛІГАТУРУ З БОРОМ

І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов

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

З метою підвищення експлуатаційних властивостей металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-50X2МНСГФ, до його шихти вводили борвмісну лігатуру ФХБ-1 з таким розрахунком, щоб отримати вміст бору в наплавленому металі на рівні 0,01 %. Експериментально досліджено вплив введення лігатури ФХБ-1 в шихту порошкового дроту на його зварювально-технологічні властивості. Встановлено, що використання лігатури з бором у шихті порошкового дроту не погіршує його зварювально-технологічні властивості, при цьому мікролегування бором призводить до подрібнення структури наплавленого металу та підвищує його твердість з *HRC* 53...57 до *HRC* 60...62 при однаковому вмісті інших легуючих елементів. Розроблений порошковий дріт ПП-Нп-50X2МНСГФ пропонується використовувати для наплавлення зносостійких шарів для захисту деталей спеціальних машин та механізмів в гірничодобувній, металургійній та інших галузях промисловості, які працюють в складних умовах абразивного зношування у поєднанні з інтенсивними ударними навантаженнями. Бібліогр. 11, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: дугове наплавлення, порошковий дріт, мікролегування, зварювально-технологічні властивості, наплавлений метал, формування наплавленого металу

Вступ. Аналіз показує, що бор досить часто застосовується в якості мікролегуючого елементу при виплавці різноманітних сталей та сплавів з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей [1–6]. Разом з тим застосування бору в якості мікролегуючої або модифікуючої добавки при наплавленні (зварюванні) досить обмежене [7–10], що пов'язане зі складнощами при виборі типу та способу введення борвмісних компонентів в зварювальну ванну, процесах засвоєння бору, визначенням його оптимальних концентрацій та ін., адже бор здатен досить суттєво впливати на властивості сталей та сплавів при його концентраціях у межах сотих і тисячних часток відсотків.

Так, в роботі [11] показано, що мікролегування наплавленого металу 25X5ФМС бором в межах 0,007...0,010 % призводить до значного подрібнення його мікроструктури та деякого збільшення мікротвердості матриці та, при цьому, не погіршує якість формування наплавленого металу.

Це позитивно впливає на експлуатаційні властивості мікролегованого бором наплавленого металу – його термо- та зносостійкість підвищується в 1,5...2,0 рази. Підвищення концентрації бору в наплавленому металі $\geq 0,02$ % призводить до подальшого підвищення мікротвердості сталі 25X5ФМС, однак негативно впливає на тріщиностійкість металу – в ньому утворюється значна кількість тріщин, які розповсюджуються через всі шари наплавленого металу.

Мета роботи полягає у визначенні впливу мікролегування бором на зварювально-технологічні властивості наплавлювального порошкового дроту ПП-Нп-50X2МНСГФ, призначеного для підвищення зносостійкості деталей спеціальних машин та механізмів в гірничодобувній, металургійній та інших галузях промисловості, які працюють в складних умовах абразивного зношування у поєднанні з інтенсивними високодинамічними ударними навантаженнями.

Матеріали та методики досліджень. Для захисту робочих поверхонь вказаних вище деталей, до яких відносяться футерувальні елементи грохотів, бункерів, кузовів кар'єрних самоскидів, лопатей і покривних дисків роторів тягодуттєвих машин та подібні їм деталі, в роботі пропонується наносити зносостійкі шари металу шляхом електродугового наплавлення під флюсом порошковим дротом марки ПП-Нп-50X2МНСГФ.

Загальна товщина наплавленого зносостійкого металу залежить від умов експлуатації конкретної деталі і може складати 3...10 мм. Враховуючи високий коефіцієнт розбавлення наплавленого металу основним (до 50 %) при дуговому наплавленні порошковими дротами, для досягнення заданого хімічного складу наплавленого металу зазвичай необхідно наплавляти 3...4 шари. Виходячи з необхідності в деяких випадках забезпечити заданий хімічний склад та властивості вже в 1...2 шарі наплавленого металу, уточнювали шихтовий склад порошкового дроту ПП-Нп-50X2МНСГФ, а також

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

Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>

© І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, 2023

в шихту додатково вводили лігатуру ФХБ-1, яка містить 12 % бору.

Кількість лігатури ФХБ-1, яку у вигляді порошку додавали безпосередньо у шихту дослідного порошкового дроту при його виготовленні, розраховували таким чином, щоб з урахуванням коефіцієнтів заповнення дроту та переходу легуючих елементів в наплавлений метал отримати вміст бору у наплавленому металі на рівні 0,01 %. Така концентрація бору в наплавленому металі була обрана з метою запобігання утворенню тріщин [11]. Конструкція порошкового дроту – трубчаста з напуском крайок, діаметр – 1,8 мм, коефіцієнт заповнення – 24 %.

Наплавлення дослідних зразків виконували одиночними валиками під флюсом АН-26П на установці У-653 із джерелом живлення ВДУ-506 з використанням наступних режимів: напруга 24 В, струм 220 А, швидкість наплавлення 20 м/год, крок наплавлення 4 мм, струм постійний, полярність зворотна. В якості основного металу використовували пластини зі сталі 40Х.

Було виготовлено дві серії дослідних зразків. Першу серію наплавляли дротами стандартного та дослідного складу у чотири шари, після чого виконували візуальний огляд наплавленої поверхні до і після її механічного зачищення. Другу серію зразків наплавляли ступінчато у один, два та три шари, після чого за допомогою рентгеноспектрального метода визначали хімічний склад наплавленого металу у верхньому шарі.

Зварювально-технологічні властивості дослідного дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ, мікролегованого бором, у порівнянні з дротом цієї ж марки стандартного складу, оцінювали за такими параметрами:

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

Для розрахунку коефіцієнтів розплавлення (α_p), наплавлення (α_n) та втрат (ψ) визначали масу пластин та дротів перед наплавленням та після нього, а також фіксували час наплавлення. Відпо-

відні коефіцієнти визначали, використовуючи широківідомі вирази:

$$\alpha_p = G_p / (I \cdot t), \quad (1)$$

$$\alpha_n = G_n / (I \cdot t), \quad (2)$$

$$\psi = ((\alpha_p - \alpha_n) / \alpha_p) \cdot 100 \% \quad (3)$$

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

Результати експериментів та їх обговорення.

Зовнішній вигляд першої серії зразків одразу після наплавлення та після механічного зачищення наплавленої поверхні наведений на рис. 1. Зі зразків другої серії були вирізані темплети (рис. 2), підготовлені мікрошліфи та проведені дослідження структури зразків при збільшеннях $\times 240$ (рис. 3, 4). Хімічний склад та твердість металу, наплавленого стандартним та дослідним порошковими дротами ПП-Нп-50Х2МНСГФ, а також

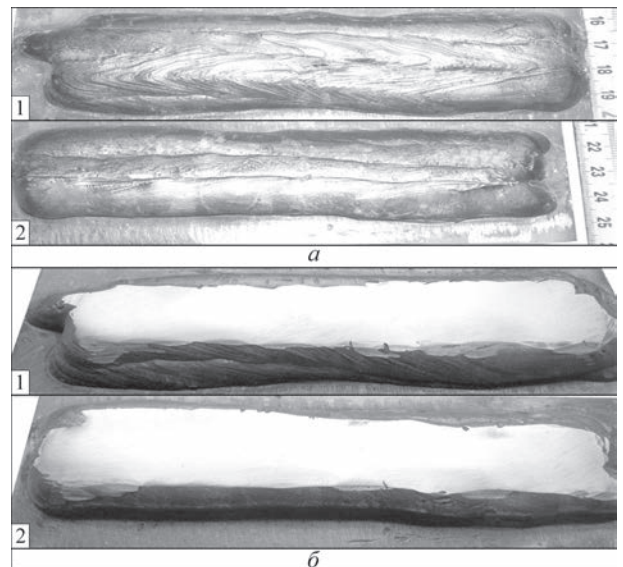


Рис. 1. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених дротами ПП-Нп-50Х2МНСГФ стандартного (1) та дослідного (2) складів одразу після наплавлення (а) та після механічного зачищення поверхні (б)

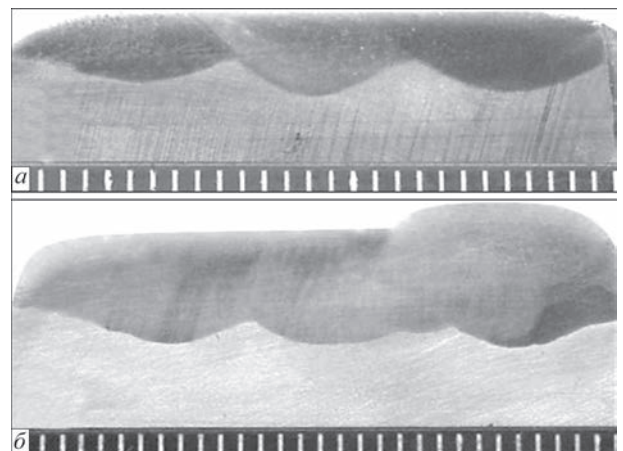


Рис. 2. Макрошліфи металу, наплавленого дротом ПП-Нп-50Х2МНСГФ дослідного складу в один (а), два та три шари (б)

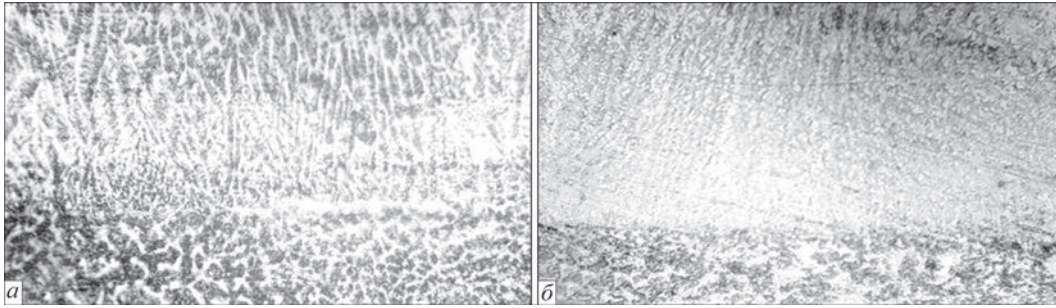


Рис. 3. Мікροструктура ($\times 240$) металу біля лінії сплавлення в зразках, наплавлених дротом ПП-Нп-50X2МНСГФ стандартного (а) та дослідного (б) складу

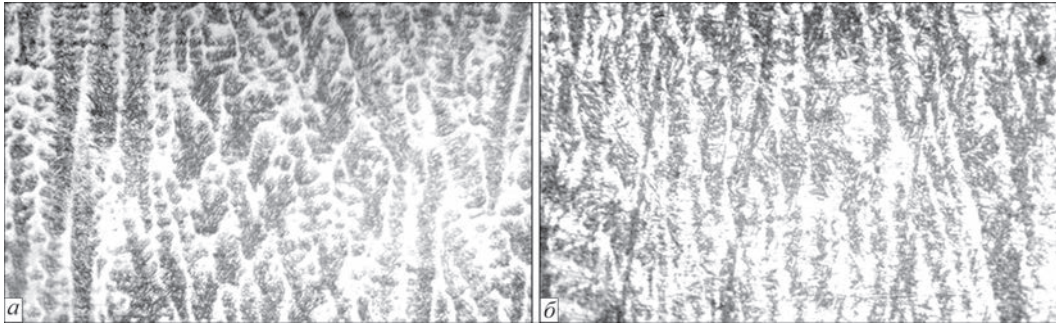


Рис. 4. Мікροструктура ($\times 240$) центральної частини металу в зразках, наплавлених дротом ПП-Нп-50X2МНСГФ стандартного (а) та дослідного (б) складу

склад наплавленого металу 50X2МНСГФ по ТУ наведено у табл. 1.

Як видно з рис. 1, мікролегування бором при його концентрації в наплавленому металі 50X2МНСГФ 0,01 % не погіршує якість його формування. Віддільність шлакової кірки в усіх зразках залишається на однаковому, задовільному рівні, шпінелі на поверхні зразків відсутні. Пори, тріщини та інші дефекти на поверхні наплавленого металу також відсутні.

Таблиця 1. Хімічний склад та твердість металу, наплавленого порошковими дротами ПП-Нп-50X2МНСГФ стандартного та дослідного складів

Тип наплавленого металу	Кількість наплавлених шарів	Масова доля елементів, %								Твердість HRC
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	B	
50X2МНСГФ, (по ТУ)	3...5	0,3...0,5	0,4...1,0	0,4...1,0	1,5...2,5	0,8...1,6	0,3...0,6	0,3...0,6	–	55...60
50X2МНСГФ (стандартний)	4	0,42	0,89	0,75	1,88	1,52	0,48	0,37	–	53...57
50X2МНСГФ (дослідний)	1	0,39	0,75	0,65	1,41	1,24	0,37	0,28	0,004	55...57
	2	0,43	0,83	0,72	1,86	1,47	0,43	0,35	0,005	57...60
	3	0,46	0,97	0,83	1,94	1,54	0,54	0,43	0,006	60...62

Таблиця 2. Зварювально-технологічні властивості порошкових дротів ПП-Нп-50X2МНСГФ стандартного та дослідного складів

Параметр	Тип дроту	
	Стандартний	Дослідний
Характер збудження дуги	легкий	легкий
Коефіцієнтами:		
– розплавлення – α_p , г/А·год	17,56	17,52
– наплавлення – α_n , г/А·год	17,04	16,98
– втрат – ψ , %	2,96	3,08
Стабільність горіння дуги	Стабільне	Стабільне
Якість формування наплавленого валика	Якісне	Якісне
Наявність дефектів в наплавленому металі	Відсутні	Відсутні
Якість відділення шлакової кірки	Задовільне	Задовільне
Відповідність хімічного складу та твердості наплавленого металу технічним вимогам	Відповідає (еталон)	Відповідає

несплавлень – відсутні. Структура металу достатньо однорідна, при цьому вона більш дрібнозерниста у випадку мікролегування бором (рис. 4, б). Узагальнені дані по порівняльній оцінці зварювально-технологічних властивостей розробленого порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ стандартного та дослідного складів наведено в табл. 2.

З даних, приведених в табл. 2, витікає, що зварювально-технологічні властивості дослідного порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ із мікролегуючими добавками бору, за всіма параметрами знаходяться на високому рівні та відповідають характеристикам дроту тієї ж марки стандартного складу.

Висновки

Встановлено, що використання лігатури ФХБ-1 з бором у шихті порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ не погіршує його зварювально-технологічні властивості. При цьому мікролегування бором у кількості 0,006...0,012 % призводить до подрібнення структури наплавленого металу та дозволяє підвищити його твердість з *HRC* 53...57 до *HRC* 60...62 при однаковому вмісті інших легуючих елементів.

Список літератури/References

1. Baker, T.N. (2016) Microalloyed steels. *Ironmaking & Steelmaking*, 43(4), 264–307. <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.0000000063>
2. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. (1986) *Борсодержащие стали и сплавы*. Lyakishev, N.P., Pliner, U.L., Lappo, S.I. (1986) *Boron-containing steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Маняк Н.А., Маняк Л.К. (2002) Влияние бора на структуру и вязкость низколегированной стали. *Металл и литье Украины*, 5-6, 23–25.

- Manyak, N.A., Manyak, L.K. (2002) Influence of boron on structure and toughness of low-alloyed steel. *Metall i Lityo Ukrainy*, 5-6, 23–25 [in Russian].
4. Проїдак Ю.С., Манидин В.С., Ісаєва Л.Є. та ін. (2020) Мікролегування низьковуглецевої сталі бором та спосіб визначення ефективної концентрації розчиненого бору. *Теорія і практика металургії*, 1, 18–23. <http://dx.doi.org/10.34185/tpm.1.2020.02>
- Proidak, Yu.S., Manydyn, V.S., Isaieva, L.E. et al. (2020) Microalloying of low-carbon steel with boron and method of determination of dissolved boron effective concentration. *Teoriya i Praktyka Metalurgii*, 1, 18–23 [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.34185/tpm.1.2020.02>
5. Mujagic, D., Imamovic, A., Hadzalic, M. (2021) The influence of microalloying with boron on properties of austenite stainless steel X8CrNiS18-9. *Int. J. of Adv. Res.*, 9, 695–700. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/13596>
6. Xiao, L.-J., Qiu, S.-T., Liu, J.-Q., Gan, Y. (2008) Research and application status of boron microalloying in high quality steel plate. *Journal of Iron and Steel Research*, 20(5), 1-4.
7. Zhudra, A.P., Krivchikov, S.Yu., Petrov, V.V. (2004) Selection of boron-containing charge materials for the core of flux-cored wire. *The Paton Welding J.*, 4, 51–52.
8. Krivchikov, S.Yu. (2012) Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *The Paton Welding J.*, 6, 19–21.
9. Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V., Goncharenko, E.I. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *The Paton Welding J.*, 6-7, 76–79. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.15>
10. Бабінець А.А., Рябцев І.О. (2021) Вплив модифікування та мікролегування на структуру та властивості наплавленого металу (Огляд). *Автоматичне зварювання*, 10, 3–11. <https://doi.org/10.37434/as2021.10.01>
- Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O. (2021) Influence of modification and microalloying on deposited metal structure and properties (Review). *The Paton Welding J.*, <https://doi.org/10.37434/as2021.10.01>
11. Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П., Богайчук І.П. (2022) Вплив мікролегування бором на структуру та властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25Х5ФМС. *Автоматичне зварювання*, 6, 3–11. <https://doi.org/10.37434/as2022.06.01>
- Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O., Lentuyugov, I.P., Bogaichuk, I.L. (2022) Influence of microalloying with boron on the structure and properties of deposited metal of the type of tool steel 25Kh5FMS. *The Paton Welding J.*, 6, 3–10. <https://doi.org/10.37434/as2022.06.01>

WELDING-TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF FLUX-CORED WIRE WITH BORON-CONTAINING BINDER IN THE CHARGE

I.O. Ryabtsev, A.A. Babinets, I.P. Lentuyugov

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

E-mail: office@paton.kiev.ua.

In order to improve the performance of metal deposited with PP-Np-50Kh2MNSGF flux-cored wire, boron-containing FKbB-1 binder was added to the wire charge in such a way as to obtain boron content on the level of 0.01 % in the deposited metal. The effect of adding FKbB-1 binder to the flux-cored wire charge on its welding-technological properties was studied experimentally. It was found that application of boron-containing binder in the flux-cored wire charge does not impair its welding-technological properties, boron microalloying leading to refinement of the deposited metal structure and increases its hardness from *HRC* 53...57 to *HRC* 60...62 at the same content of other alloying elements. Developed PP-Np-50Kh2MNSGF flux-cored wire is proposed for deposition of wear-resistant layers for protection of parts of special machines and mechanisms in mining, metallurgical and other industries, operating under the difficult conditions of abrasive wear in combination with intense shock loads. 11 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: arc surfacing, flux-cored wire, microalloying, welding-technological properties, deposited metal, deposited metal formation

Надійшла до редакції 30.06.2023

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І ЕВОЛЮЦІЯ СТРУКТУРИ НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ІНСТРУМЕНТОМ З рсBN

А.Л. Майстренко¹, М.П. Беженар¹, С.Д. Заболотний¹, В.А. Дутка¹, М.О. Черв'яков², А.М. Степанець¹,
І.О. Гнатенко¹, М.О. Цисар¹

¹ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України. 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. E-mail: otchel9m@ism.kiev.ua

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

Показано, що використання надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору для виготовлення робочих елементів інструмента для реалізації процесів зварювання сталей тертям з перемішуванням дає можливість забезпечити термомеханічну стійкість інструмента. Виконано комп'ютерне моделювання температурного поля в інструменті та у сталевих деталях в процесі зварювання сталей тертям з перемішуванням нержавіючих сталей інструментом на основі полікристалічного нітриду бору (рсBN). Показано узгодження чисельних і експериментальних результатів розподілу температури в зоні руху інструмента. Визначено міцність зварних з'єднань деталей з нержавіючих сталей та проаналізовано еволюцію структури зварних швів. Бібліогр. 17, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: еволюція структури, зварювання тертям з перемішуванням, інструмент, киборит, міцність, моделювання, нержавіючі сталі, температурне поле

Вступ. Як відомо, процес зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) здійснюється при температурах значно нижчих за температури плавлення зварюваних металів та сплавів, в результаті чого суттєво знижуються залишкові напруження й температурні деформації, еволюціонує мікроструктура зони з'єднання, що позитивно впливає на забезпечення міцності матеріалу деталей у зоні їх з'єднання. Спочатку цей метод успішно застосовувався для зварювання сплавів на основі магнію та алюмінію [1]. Магнієві сплави виявилися легко зварюваними матеріали методом ЗТП, оскільки процес зварювання здійснюється при невисоких температурах (200...260 °С) з використанням сталевих інструментів [1–3]. При зварюванні алюмінієвих сплавів тертям з перемішуванням характерні температури в зоні зварювання спостерігались в діапазоні 300...400 °С. Реалізація процесу ЗТП матеріалів на основі міді здійснюється вже при температурах 600...700 °С, що вимагає використання інструментів з твердих сплавів [4]. Але для зварювання сталей і жароміцних сплавів, в процесі зварювання яких спостерігається температура 600...1000 °С, необхідний інструмент вже із значно більшою термомеханічною стійкістю, зокрема, на основі спеціальних твердих сплавів або полікристалічних матеріалів на основі сBN [5, 6]. Для обґрунтування оптимальних конструкцій інструмента, раціональних режимів зварювання й одержання якісного з'єднання деталей в резуль-

таті ЗТП доцільно передусім виконувати математичне моделювання теплового стану інструмента й зварюваних деталей в процесі зварювання [5–7].

За останні 20 років спосіб ЗТП використовують для зварювання термостійких сплавів і сталей. Для реалізації процесу ЗТП нержавіючих сталей аустенітно-феритного типу і жароміцних сплавів необхідно застосовувати інструмент із термоміцних матеріалів, до яких відносяться спеціальні тверді сплави та полікристалічні матеріали на основі кубічного нітриду бору (рсBN) [8, 9].

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України ведуться роботи, спрямовані на розробку й застосування інструментів для ЗТП різних металів і сплавів [1–4, 7]. При цьому властивості матеріалів, які використовуються для виготовлення інструментів, повинні значно перевищувати механічні характеристики матеріалів, які зварюються або наплавляються. Крім того, інструмент, особливо його робоча частина (Pin), повинна зберігати високу зносостійкість і термостійкість при високих температурах. Ці матеріали мають зберігати свої властивості при значних температурах й циклічних напруженнях, які обумовлені зусиллями, діючими на інструмент при круговому згині в процесі зварювання або наплавлення.

Мета даної роботи полягає у створенні інструмента з полікристалічного нітриду бору (рсBN) для зварювання тертям з перемішуванням нержавіючих сталей і сплавів.

Майстренко А.Л. – scopus 7003594126, <https://orcid.org/0000-0001-5479-326X>, Беженар М.П. – scopus 6506265277, Заболотний С.Д. – scopus 57216653335, <https://orcid.org/0000-0003-1287-8454>, Дутка В.А. – scopus 6603362360, Черв'яков М.О. – <https://orcid.org/0000-0003-4440-7665>, Гнатенко І.О. – scopus 57201993202, <https://orcid.org/0000-0002-9466-0215>, Цисар М.О. – scopus 54406108100, <https://orcid.org/0000-0002-4494-9109>

© А.Л. Майстренко, М.П. Беженар, С.Д. Заболотний, В.А. Дутка, М.О. Черв'яков, А.М. Степанець, І.О. Гнатенко, М.О. Цисар

віючих сталей, аналізі теплових процесів при зварюванні та оцінці механічних характеристик зварних з'єднань.

Матеріали та методики досліджень. Полікристалічні надтверді матеріали на основі cBN відомі на світовому ринку як інструментальні pcBN матеріали. Тенденції розвитку досліджень в області створення полікристалічних надтвердих матеріалів на основі КНБ можна ілюструвати на прикладі продукції ряду закордонних фірм, зокрема, фірм Element Six та MegaDiamond [10, 11]. У матеріалі цього класу Киборит [8, 9], в якому основна фаза cBN (близько 84%), що є визначальним фактором формування структури композиту з неперервним каркасом та високої твердості. Киборит усіх марок отримують реакційним спіканням cBN з Al в умовах високого тиску в твердосплавних апаратах високого тиску (АВТ) конструкції «ковадло з поглибленням» типу «тороїд» [8, 9]. Особливості властивостей композитів на основі pcBN полягають в тому, що вони мають високу твердість і тріщиностійкість, хімічну стійкість та механізм зношування переважно трибохімічний. У першому випадку в складі матеріалу більш 80% cBN, твердість забезпечує каркас cBN, висока тріщиностійкість – завдяки сполучному по границях зерен (табл. 1) [9]. Більш висока твердість у матеріалів із вмістом cBN у структурі більш 95%, прикладом такого матеріалу є розроблений в ІНМ НАН України матеріал «Киборит-1». Особливість структури – відсутність безперервного каркаса зв'язування (склад зв'язки AlN і AlB_{12} , кількість – 3% по масі, розташована у вигляді включень по границях зерен). Матеріал «Киборит-2» – pcBN одержують методом попереднього просочення алюмінієм стислого порошку cBN з наступним реакційним спіканням при високому тиску [8, 9]. Параметри спікання матеріалу «Киборит-2» – температура 1600...1750 К й тиск до 4,5 ГПа, при цьому слід зазначити додаткове виділення енергії хімічної реакції в робочому обсязі поряд з енергією зовнішнього нагрівання. Для такого процесу кращими є сталеві АВТ [12], одна з переваг яких – великий робочий обсяг, що дозволяє одержувати зразки великого розміру діаметром 32 мм і висотою 15 мм на пресах зусиллям 20 МН (табл. 1).

На рис. 1 представлені зміни відносної щільності (ρ), твердості (H_k) і тріщиностійкості (K_{Ic}) у полікристалічних матеріалах розглянутого типу для трьох груп (А, В, С) [9].

Нове застосування Киборита – робочий інструмент для зварювання тертям з перемішуванням. Обертіві інструменти цього типу складаються з бурту і виступаючого штиря (Pin) – рис. 2. При зварюванні штир заглиблюється у заготовку, а бурт притискається до поверхні. Тертя при обер-

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості деяких марок Киборита [9]

Характеристики	Киборит-1	Киборит-2	Киборит-3
Кількість КНБ, %	96...97	84	70...75
Питома вага, г/см ³	3,40...3,45	3,35...3,38	3,60
Твердість по Кнупу при навантаженні 10 Н, ГПа	32...36	28...30	27
Тріщиностійкість K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	8...13,5	10,5	10,5
Міцність при стиску, ГПа	3,2	2,9	2,9
Міцність при розтягу, ГПа	0,37	-	-
Модуль пружності E , ГПа	880	-	-
Коефіцієнт Пуассона	0,16		
Теплопровідність λ , Вт/(м·К)	150	70	70
Термостійкість до температури, К	1400	1400	1400
Стійкість до окислення на повітрі до температури, К	1200	1200	1200
КТР, $\alpha \cdot 10^{-6} K^{-1}$	-	4,9...7,9	-
Діаметр пластини, мм	6,35...12,7	9,6... 31,8	9,6...31,8

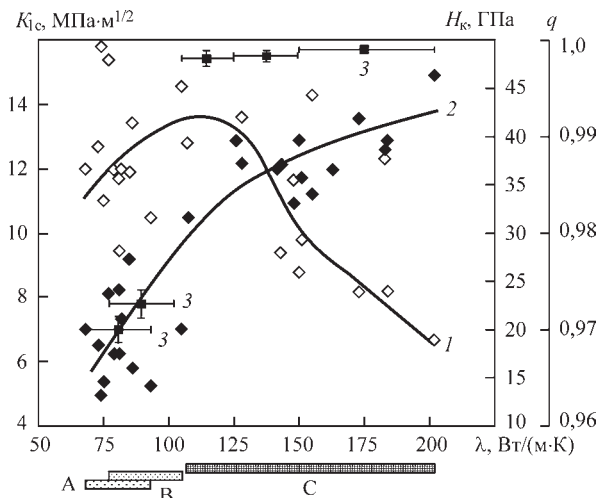


Рис. 1. Тріщиностійкість (1), твердість (2) і відносна щільність (3) полікристалів, отриманих реакційним спіканням порошку КНБ із 2 мас. % Al [9]

танні інструмента генерує теплоту, яка достатня для переходу матеріалів, що з'єднуються, до в'язко-пластичного стану.

Киборит-1 був отриманий шляхом реакційного спікання порошку кубічного нітриду бору (до 98%) з алюмінієм [8, 9]. Присутність у шихті інших добавок і високі параметри спікання призвели до одержання в складі зв'язки Киборита-1, поряд з AlN і AlB_{12} , також вищого бориду $\beta-AlB_{12}$. Комбінація високої твердості H_k (36...38 ГПа) і високої теплопровідності (100...150) Вт/м·К з достатнім рівнем тріщиностійкості (≥ 8 МПа·м^{1/2}) Киборита-1 забезпечило можливість його використання в лезових інструментах. В основу створення надтвердого полікристалічного матеріалу Ки-

борит-2 покладені принципи створення матеріалу з безперервною структурою каркаса КНБ та реакційне спікання з алюмінієм. Відмінність полягала в такому керуванні параметрами спікання, яке забезпечувало збільшення поверхні контакту «КНБ – інша фаза» при збереженні в структурі безперервного каркаса КНБ [9]. Наведені результати показують, що твердість реальних полікристалів, що містять від 65 до 96 % КНБ і зв'язці на основі AlN, у всіх випадках трохи нижча, ніж розрахована в припущенні адитивної залежності від фазового складу.

Таким чином, ми маємо можливість вибору з композитів ряду Киборит відповідного для використання в інструментах для зварювання сталей тертям з перемішуванням. Для виготовлення інструментів вибрали саме Киборит-2, керуючись його високою термостійкістю (1200 °C), а також тому, що цей матеріал має максимальну тріщиностійкість $K_{Ic} = 10,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, що має важливе значення при циклічному круговому згині штиря, та розмірами діаметру й висоти заготовки 32×15 мм, які дали можливість виготовити інструменти з розміром штиря висотою 5...6 мм та діаметром бурта 25 мм (рис. 2, а).

Для досліджень були вибрані нержавіючі сталі типу AISI304 (аналог 08X18H10), 08X18H10T (аналог AISI 321), 03X20H16AG6, 02X18MBB та жароміцні сплави ЕП-718 (ХН45МВТЮБР) та ЭИ 698 (ХН73МБТЮ) [13], механічні властивості деяких з них наведено в табл. 2. Зовнішній вигляд

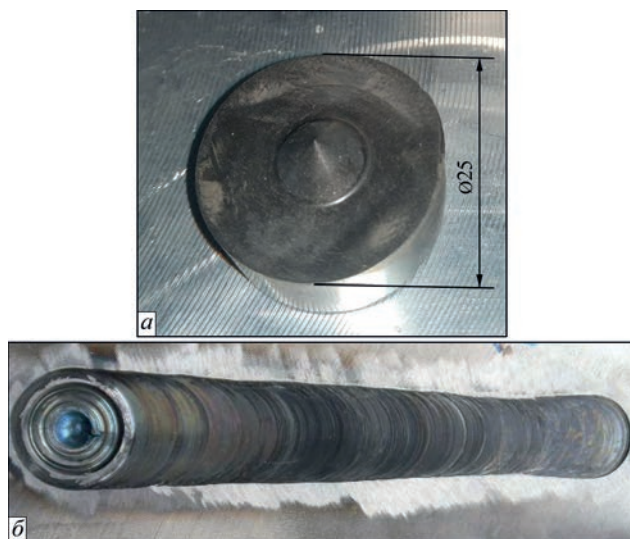


Рис. 2. Загальний вигляд інструмента із полікристалічного нітриду бору для зварювання нержавіючих сталей (а) та загальний вигляд зварного шва при зварюванні сталі AISI 304 (б)

зварного шва при зварюванні сталі AISI 304 наведено на рис. 2, б.

Вимірювання складових сили при зварюванні сталей. Дослідження зварювання сталей тертям з перемішуванням з вимірюванням складових сили, діючої на інструмент, виконувались на стенді, уставленому на столі вертикально-фрезерувального верстату 654, оснащеного вимірювальними давачами та програмним забезпеченням фірми НВМ (рис. 3). Режими зварювання: частота обертання інструмента 800 об⁻¹ та швидкість подачі 20...50 мм/хв. Інструмент встановлений під кутом 88° відносно поверхні деталі. Досліджувались зразки завтовшки 3...4 мм (табл. 3). Зварювання зразків досліджуваних сталей виконувалось на спеціальному стенді, оснащеному системою давачів, які вимірюють вертикальну та зсувну складові сили, прикладеної до виконуючого інструмента (рис. 3, табл. 3). Встановлено, що середні складові сили незалежно від частоти обертання і швидкості зварювання інструментом з конічною робочою частиною утримуються на одному рівні для всіх зразків досліджених сталей однакової товщини (табл. 2).

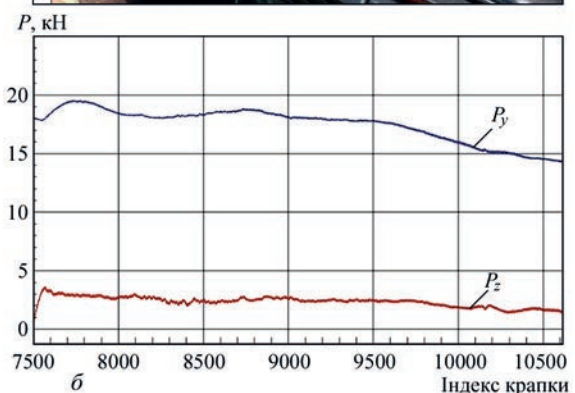


Рис. 3. Загальний вигляд стенда для дослідження процесу зварювання сталей тертям з перемішуванням (а), графік зміни складових сили, що діє на інструмент (б)

Таблиця 2. Механічні властивості досліджуваних матеріалів [13]

Сталь	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	$T_{лип}$, °C
08X18H10T (аналог AISI 321)	193	196	470	40	1400...1455
AISI 304 (аналог 08X18H10)	196	205	510	40	1400...1455
ЕП-718 (ХН45МВТЮБР) (згідно ТУ 14-1-3905-85)	205	550	1240	30	1260...1336
ЭИ 698 (ХН73МБТЮ)	200	705	1150	16	1370...1400

Таблиця 3. Результати вимірювань складових сил (ЗТП) зразків досліджуваних нержавіючих сталей

Матеріал зразків	Товщина зразка, мм	Горизонтальна складова P_x , Н		Вертикальна складова P_y , Н	
		середня	max	середня	max
03X20H16AG6	4	2385	3423	17597	19545
AISI 304 (аналог 08X18H10)	3	1226	2766	11992	15780

Вимірювання температури в зоні зварювання. Вимірювання температури в зоні зварювання виконувалось за допомогою інфрачервоного тепловізора Fluke-ir25 з дискретністю 5 с в різні моменти часу руху інструмента по зразку (рис. 4).

Моделювання температурного поля при ЗТП нержавіючих сталей. Проведено математичне моделювання температурного поля у зварюваних деталях у процесі ЗТП. Обрана тривимірна стаціонарна модель, яка базується на нелінійному рівнянні теплопровідності. Враховується перерозподіл теплових джерел на поверхнях контакту штиря інструмента з деталями, що зварюються. Враховується також теплообмін із зовнішнім повітряним середовищем на вільних поверхнях деталей.

Матеріал зварюваних деталей – нержавіюча сталь AISI 304. Дві пластини розміром 200×100×3 (4) мм зварювались методом ЗТП вздовж більшого розміру платин. Інструменти для зварювання виконані з матеріалу Киборит-2. У розрахунках враховано залежності теплофізичних властивостей сталі AISI 304 від температури: теплоємність C_p , коефіцієнт теплопровідності λ , густина ρ , межа плинності σ_T [14–16].

Математична модель температурного поля. Для опису температурного поля в зоні ЗТП розглядалась стаціонарна математична модель [17]

$$C_p \rho (\vec{u} \cdot \text{grad} T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T), \quad (1)$$

де T – температура; C_p , ρ , λ – відповідно питома теплоємність, густина і коефіцієнт теплопровід-

ності; \vec{u} – вектор швидкості поступального руху деталей відносно інструмента.

На поверхнях інструмента та деталей (пластин), а також на поверхнях контакту інструмента і пластин задаються відповідні граничні умови. На поверхні контакту штиря, буртика і пластин діють теплові джерела тепла, зумовлені тертям і пластичним деформуванням матеріалу пластин у цій зоні контакту.

На поверхні контакту буртика діють теплові джерела, зумовлені тертям. Потужність цих джерел тепла обчислюється за формулою

$$q_s = \begin{cases} \frac{2\pi r n \mu F_n}{A_s}, & \text{при } T < T_{\text{пл}}, \\ 0, & \text{при } T \geq T_{\text{пл}}, \end{cases} \quad (2)$$

де r – віддаль від точки цієї поверхні контакту до осі обертання буртика зі штирем (піном); n – кількість обертів буртика за хвилину; μ – коефіцієнт тертя; F_n – осьове зусилля, що діє на штир з буртиком; A_s – площа поверхні контакту буртика з деталями; $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення матеріалу пластин.

На рис. 5 представлені результати розрахунків розподілів температури в складових конструкції інструмента та зварювальної пластини з нержавіючої сталі AISI 304. На рис. 6 наведено порівняння експериментальних та розрахункових температур. Наведені максимальні значення експериментально виміряних температур на жаль обмежені характе-

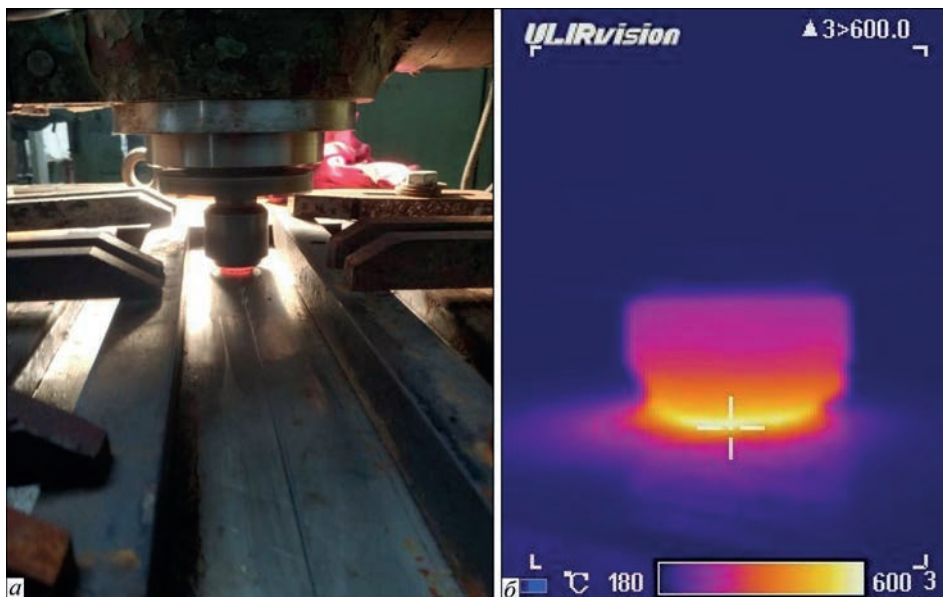


Рис. 4. Зображення процесу ЗТП пластин зі сталі AISI 304 завтовшки 3 мм (а), вимірювання розподілу температури при ЗТП нержавіючої сталі (поза межами буртика інструмента) (б)

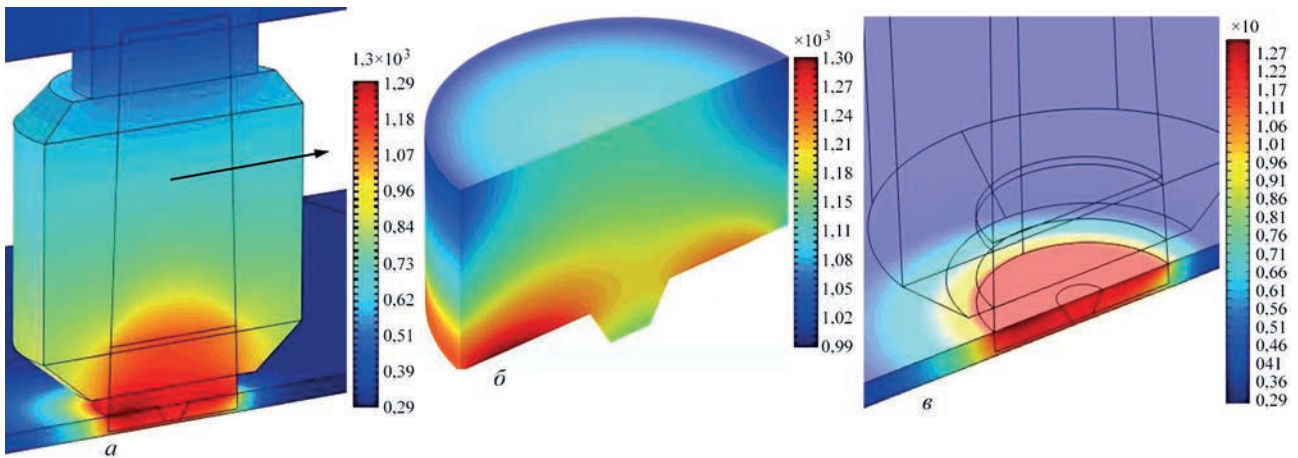


Рис. 5. Картини температурного поля, обчисленого в різних частинах розрахункової області (максимальна температура – 1303 К): а – в пластині, інструменті і оснащенні інструмента (стрілкою вказано напрям поступального руху інструмента); б – в інструменті; в – у зварювальній пластині

ристиками приладу та складністю доступу приладу до зони зварювання, але це означає, що це не максимальні діючі температури в зоні зварювання, а тільки максимальні температури на вимірному (обмеженому) відрізку.

Результати досліджень та обговорення. Проведено експериментальне визначення розподілу температури в зоні зварювання досліджуваних сталей. Результати розподілів температури вимірних в зонах зварювання досліджених сталей поза буртиком інструмента наведено на рис. 7.

Максимальна виміряна температура зварювання зразків сталей змінювалась від 500 до 800 °С (рис. 7), причому температура зварювання зразків завтовшки 4 мм практично у 1,5 рази більша за температуру у зразках завтовшки 3 мм, що обумовлено більшою роботою пластичних деформацій в зоні зварювання. Також звернемо увагу на

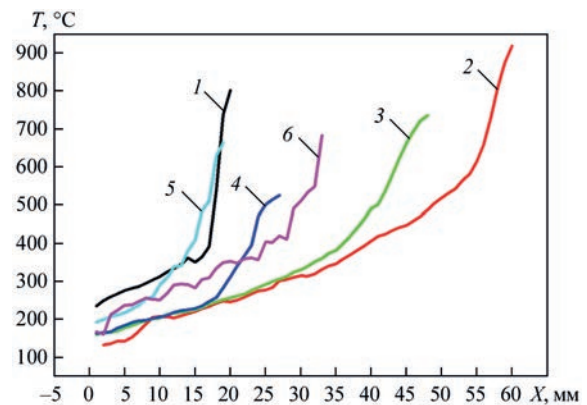


Рис. 7. Експериментально визначені розподіли температури позаду буртика інструмента в процесі ЗТП: товщина пластини сталі 08X18N10T (1) – 4 мм; сталі 02X18MBB (2) – 4 мм; сталі 03X20N16AG6 (3) – 4 мм; сталі AISI 304 (4) – 3 мм; ЕП-718 (5) – 4,3 мм; сталі ХН73МБТЮ (6) – 4,3 мм; координата X – масштабна лінійка зварюваного зразка сталі

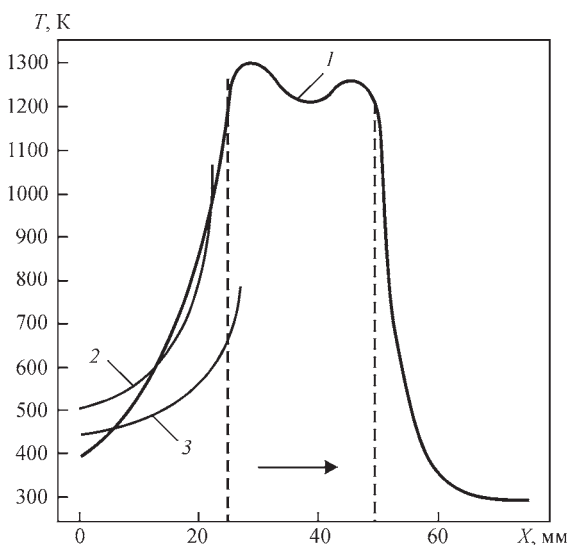


Рис. 6. Порівняння розрахункових (1) і експериментальних (2, 3) температур уздовж лінії зварювання пластин сталі, що зварюються. Координата X, мм – масштабна лінійка зварюваного зразку сталі. Стрілкою показано напрямок руху інструмента. Пунктирні лінії – межі бурту інструмента (2 – сталь X18N10T – 4 мм; 3 – сталь AISI 304 – 3 мм)

те, що середня температура при зварюванні досліджених сталей дорівнює $T_{\text{сеп}} = 712$ °С, тобто середня температура зварювання сталей аустенітно-феритного класу відповідає рівнянню $T_{\text{зв}} = (0,45 \dots 0,62) T_{\text{пл}}$, на відміну від відомого діапазону температур зварювання магнієвих та алюмінієвих сплавів, який відповідав співвідношенню $T_{\text{зв}} = (0,4 - 0,5) T_{\text{пл}}$.

Металографічні дослідження зварних зразків виконувались на полірованих шліфах, протравлених розчином $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ протягом 5 хв. Зображення мікроструктури, що отримані на оптичному мікроскопі XUM-102, при збільшенні $\times 500$ наведено на рис. 8. Розміри окремих зерен визначалися з використанням програми LevenhukLite та наведені безпосередньо на зображеннях.

При зварюванні сталі 08X18N10T розмір зерен практично не змінюється, оскільки розмір окремих зерен в зоні зварювання знаходиться в межах 10...20 мкм, а у вихідному металі 5...15 мкм. Розміри зерен в зоні зварювання сталі 02X18MBB 10...50 мкм, а в матеріалі, що зварюється –

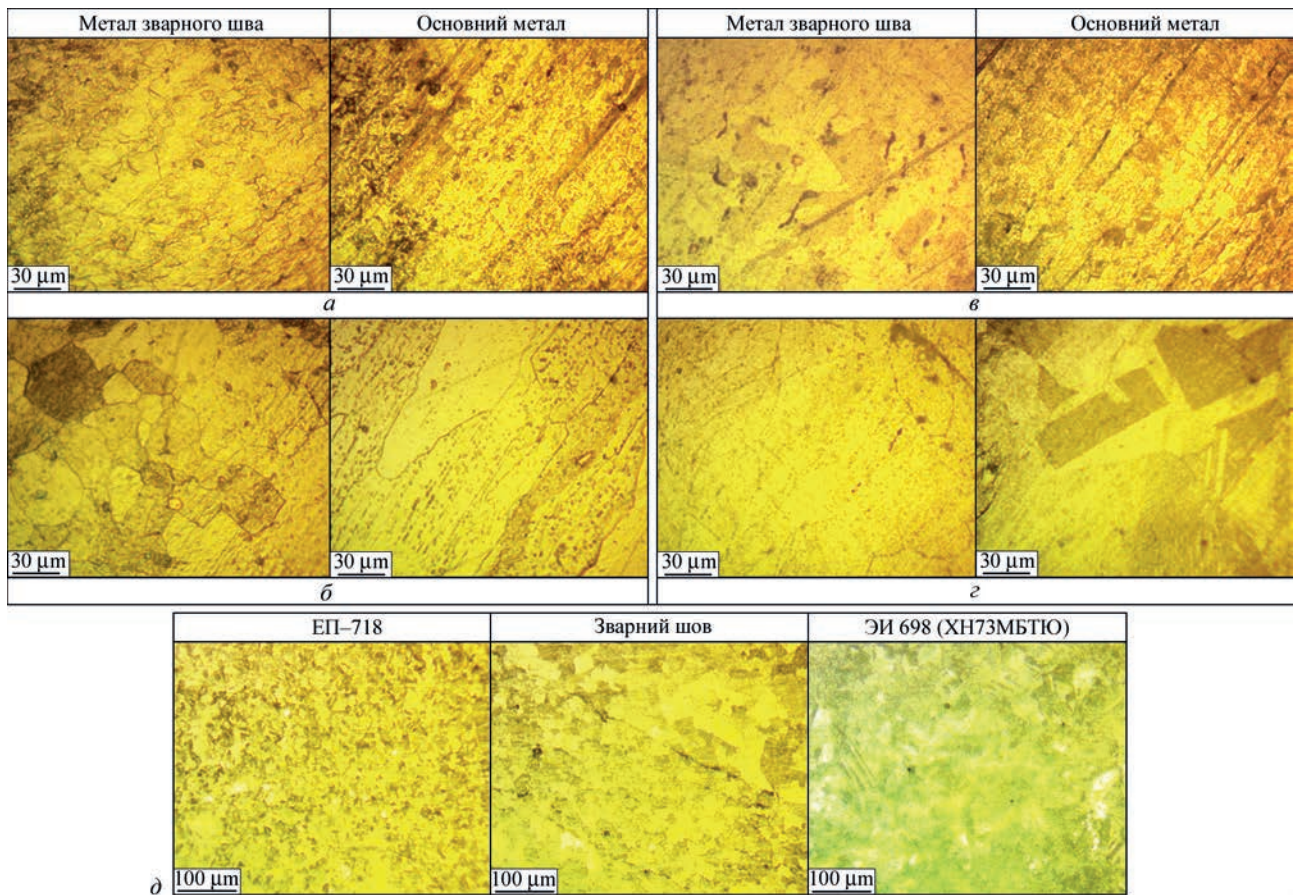


Рис. 8. Еволюція структури зварних швів у досліджених сталях ($\times 500$): 08X18H10T (а); 02X18MBB (б); 03X20H16AG6 (в); AISI 304 – аналог сталі 08X18H10 (г) EP 718 + ЭИ 698 (д)

50...150 мкм, тобто розмір зерна у зварному шві зменшується відносно вихідного металу від 3 до 5 разів. В зоні зварювання сталі 03X20H16AG6 спостерігається зростання окремих зерен. Так, якщо в основному металі маємо зернистість 2...10 мкм, то в зоні зварного шва зернистість зростає до 10...50 мкм. Зернистість металу зварного шва сталі AISI 304 (аналог сталі 08X18H10) досягає 20...60 мкм, а в основному металі розмір зерна досягає 40...100 мкм, тобто при зварюванні сталі AISI 304 в зоні зварного з'єднання відбувається зменшення розміру зерен від 1,6 до 2,0 разів.

З аналізу результатів металографії зміни розмірів зерен у комбінованому зварному шві відношення розмірів зерен у зварному шві сплаву EP-718 до розмірів зерен в основному металі зменшується практично в 2 рази, а розміри зерен

у зварному шві сталі ЭИ 698 зменшується відносно розмірів зерен в основному металі у 3 рази.

Міцність з'єднань досліджених сталей зварених тертям з перемішуванням. Випробовування зварних зразків матеріалів на розтяг виконували на сервогідравлічній машині MTS-318.25. Всі зразки досліджуваних металів для визначення міцності вирізались в одному напрямку – ортогонально вісі зварювання пластин. Визначено міцність зварних з'єднань досліджених сталей по відношенню до міцності основного металу цих сталей. Слід відзначити, що відношення міцності зварного з'єднання до основного металу змінювалось від 0,51 до 0,68 (табл. 4), тобто зниження міцності достатньо суттєве, що визначає необхідність оптимізувати кінематичні та силові параметри процесу ЗТП, які забезпечать більшу міцність зварних з'єднань. Тому оптимізація кінематичних та силових параметрів процесу зварювання, які мають забезпечити високу міцність зварного з'єднання, вимагає тривалого й кропіткого дослідження, яке є наступною задачею розвитку цього технологічного напрямку.

Висновки

1. Створено інструмент із полікристалічного нітриду бору (pcBN) для ЗТП нержавіючих сталей та жароміцних нікелевих сплавів. Виготов-

Матеріал	Тип зразка	σ_t , МПа	σ_R , МПа	σ_R/σ_t
08X18H10T	Основний метал	194	474	
	Зварне з'єднання	135	280	0,59
02X18MBB	Основний метал	429	707	
	Зварне з'єднання	183	385	0,54
03X20H16AG6	Основний метал	403	758	
	Зварне з'єднання	275	390	0,51
AISI 304	Основний метал	202	511	
	Зварне з'єднання	171	349	0,68

лено дослідні інструменти з pcBN Киборит-2 для здійснення процесу ЗТП елементів конструкцій з нержавіючих сталей та жароміцних сплавів завтовшки до 4 мм.

2. Запропоновано модель теплового процесу зварювання нержавіючої сталі тертям з перемішуванням та розраховано розподіли температури в інструменті та зварюваних деталях.

Дослідження теплових процесів при зварюванні показали, що максимальна температура в зоні зварювання досліджених сталей, в залежності від товщини зварюваних зразків, змінювалась від 500 до 900 °C, що складає орієнтовно $(0,45 \dots 0,62) T_{пл}$.

3. Виконано металографічне дослідження середнього розміру зерна зварного шва у порівнянні з основним металом зразку. Так, середній розмір зерен в зоні зварювання сталі 08X18H10T знаходиться в межах 10...20 мкм, а у вихідному металі 5...15 мкм, тобто залишається без суттєвих змін. Середні розміри зерен в зоні зварювання сталі 02X18MBB досягають 10...50 мкм, а в матеріалі зварного шва 50...150 мкм, тобто розмір зерна у зварному шві зменшується відносно основного металу від 3 до 5 разів. В зоні зварного шва сталі 03X20H16AG6 спостерігається незначний ріст розмірів до 10...50 мкм відносно основного металу з розмірами зерен 2...10 мкм. Розмір зерен у зварному шві сталі AISI 304 досягає 20...60 мкм відносно основного металу з розмірами зерен 40...100 мкм. Тобто при зварюванні в зоні зварного з'єднання відбувається зменшення розміру зерен від 1,6 до 2,0 разів. Середній розмір зерен у зварному шві змішаного з'єднання сплавів ЕП-718 та ЭИ-698, по відношенню до розміру зерен в основному металі цих сплавів, зменшуються від 2 до 3 разів.

4. Співвідношення міцності зварних з'єднань досліджених матеріалів по відношенню до міцності основного металу змінювалось від 0,51 до 0,68, що визначає необхідність провести більш глибокі дослідження, спрямовані на оптимізацію кінематичних й силових параметрів процесу ЗТП, які забезпечать більшу міцність зварних з'єднань цього типу.

Список літератури

1. Майстренко А.Л., Лукаш В.А., Заболотный С.Д. и др. (2016) Применение метода трения с перемешиванием для сварки магниевых сплавов и модификации их структуры. *Автоматическая сварка*, **5**, 74–81.
2. Майстренко А.Л., Лукаш В.А., Усенко Б.О. и др. (2019) Сварка алюминиевых криволинейных панелей методом трения с перемешиванием. *Тези Всеукраїнської міжнародної конференції «Проблеми зварювання та споріднених технологій», 17–19 вересня 2019 р., Миколаїв–Коблево*, 85–86.
3. Гнатенко І.О., Олійник Н.О., Ільницька Г.Д. та ін. (2019) Вплив зварювання тертям з перемішуванням на корозійну стійкість високоміцних алюмінієвих сплавів. Породо-рущуючий і металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: *Сб. науч. тр. 2019. Вып. 22. Киев, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины*, сс. 469–476.

4. Григоренко Г.М., Адеева Л.И., Туник А.Ю. и др. (2015) Использование метода сварки трением с перемешиванием для ремонта и восстановления изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 60–63.
5. Zhu, X.K., Chao, Y.J. (2004) Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **146**, 263–272.
6. Al-moussawi, M., Smith, A., Young, A. et al. (2016) An Advanced Numerical Model of Friction Stir Welding of DH36 Steel, *11th International Symposium of friction stir welding. Cambridge, UK. Conference Paper*. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/305330065>
7. Майстренко А. Л., Нестеренков В. М., Дутка В. А. и др. (2015) Моделирование тепловых процессов при сварке и модификации структуры металлов и сплавов трением с перемешиванием. *Автоматическая сварка*, **1**, 5–14.
8. Новіков М.В., Шульженко О.О., Беженар М.П. та ін. (1998) *Спосіб спікання композиційного матеріалу на основі кубічного нітриду бору*. Пат. 25281А, Україна, МКІ С04В35/5831. Заявл. 21.07.97, Опубл. 25.12.98, бюл. № 6.
9. Новіков Н.В., Шульженко А.А., Беженар Н.П. и др. (2001) Киборит: получение, структура, свойства, применение. *Сверхтвердые материалы*, **2**, 40–51.
10. *Megadiamond pcBN Products for Industrial Tooling*. USA: The Publication of Megadiamond.
11. *Introduction to De Beers PCD and pcBN cutting tool materials: 1.2.3.* – The Publication of De Beers Industrial Diamond Division.
12. Беженар Н.П., Романенко Я.М., Коновал С.М. и др. (2018) Киборит: новые материалы и новые области применения. *VI-я Международная самсоновская конференция «Материаловедение тугоплавких соединений», 22–24 мая, г. Киев, Украина*.
13. Зубченко А.С. (2003) *Марочник сталей и сплавов*. Москва, Машиностроение.
14. Bentz, D.P., Prasad, K. (2007) *Thermal Performance of Fire Resistive Materials I. Characterization with Respect to Thermal Performance Models*, Edition: NISTIR 7401; Publisher: U.S. Department of Commerce.
15. Bentz, D.P., Flynn, D.R., Kim, J.H., Zarr, R.R. (2006) A Slug Calorimeter for Evaluating the thermal Performance of Fire Resistor Materials. *Fire and Materials*, **30** (4), 257–270.
16. Bogaard, R.H., Desai, P.D., Li, H.H., Ho, C.Y. (1993) Thermophysical Properties of Stainless Steels. *Thermochimica Acta*, **218**, 373–393.
17. Nandan, R., Roy, G.G., Lienert, T.J., DebRoy, T. (2006) Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, **11**, 5, 526–53.

References

1. Majstrenko, A.L., Lukash, V.A., Zabolotny, S.D. et al. (2016) Application of friction stir method for welding of magnesium alloys and their structure modifying. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 68-74.
2. Maistrenko, A.L., Lukash, V.A., Usenko, B.O. et al. (2019) Welding of aluminium curvilinear panels by friction stir welding method. In: *Abstr. of Papers of All-Ukrainian Int. Conf. on Problems of Welding and Related Technologies* (17-19 September, 2019, Mykolaiv-Kobleva), 85–86.
3. Gnatenko, I.O., Oliinyk, N.O., Ilnytska, G.G. et al. (2019) Influence of friction stir welding on corrosion resistance of high-strength aluminium alloys. Rock destruction and metal-working tool: Technique and technology of its fabrication and application. Issue 22. Kyiv, ISM, 469–476 [in Russian].
4. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. et al. (2015) Application of friction stir welding method for repair and restoration of worn-out copper plates of MCCB moulds. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 55-58.
5. Zhu, X.K., Chao, Y.J. (2004) Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel. *J. of Materials Proc. Technology*, **146**, 263–272.

6. Al-moussawi, M., Smith, A., Young, A. et al. (2016) An Advanced Numerical Model of Friction Stir Welding of DH36 Steel. In: *Proc. of 11th Inter. Symp. of Friction Stir Welding. Cambridge, UK*. <https://www.researchgate.net/publication/305330065>
7. Majstrenko, A.L., Nesterenkov, V.M., Dutka, V.A. et al. (2015) Modeling of heat processes for improvement of structure of metals and alloys by friction stir welding method. *The Paton Welding J.*, **1**, 2-10.
8. Novikov, M.V., Shulzhenko, O.O., Bezhenar, M.P. et al. (1998) *Method of sintering of composite material based on cubic boron nitride*. Pat. 25281A, Ukraine, Int. Cl. C04B35/5831. Fil. 21.07.97, Publ. 25.12.98 [in Ukrainian].
9. Novikov, M.V., Shulzhenko, O.O., Bezhenar, M.P. et al. (2001) Kiborit: manufacture, structure, properties, application. *Sverkhtyvordye Materialy*, **2**, 40-51 [in Russian].
10. *Megadiamond pcBN Products for Industrial Tooling*. USA: The Publication of Megadiamond.
11. *Introduction to De Beers PCD and pcBN cutting tool materials: 1.2.3.* – The Publication of De Beers Industrial Diamond Division.
12. Bezhenar, N.P., Romanenko, Ya.M., Konoval, S.M. et al. (2018) Kiborit: New materials and new fields of application. In: *Proc. of 6th Int. Samsonov Conf. on Materials Science of Refractory Compounds* (Kyiv, Ukraine, 22-24 May 2018).
13. Zubchenko, A.S. (2003) Grades of steels and alloys. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
14. Bentz, D.P., Prasad, K. (2007) *Thermal Performance of Fire Resistive Materials I. Characterization with Respect to Thermal Performance Models*, Edition: NISTIR 7401; Publisher: U.S. Department of Commerce.
15. Bentz, D.P., Flynn, D.R., Kim, J.H., Zarr, R.R. (2006) A slug calorimeter for evaluating the thermal performance of fire resistive materials. *Fire and Materials*, **30** (4), 257-270.
16. Bogaard, R.H., Desai, P.D., Li, H.H., Ho, C.Y. (1993) Thermophysical properties of stainless steels. *Thermochemica Acta*, **218**, 373-393.
17. Nandan, R., Roy, G.G., Lienert, T.J., DebRoy, T. (2006) Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **11**(5), 526-53.

THERMAL PROCESSES AND EVOLUTION OF STAINLESS STEEL STRUCTURE IN FRICTION STIR WELDING WITH A TOOL FROM pcBN

A.L. Maistrenko¹, M.P. Bezhenar¹, S.D. Zabolotnyi¹, V.A. Dutka¹, M.O. Cherviyakov², A.M. Stepanets¹, I.O. Gnatenko¹, M.O. Tsysar¹

¹V. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine, 2 Avtozavodska Str., 04074, Kyiv. E-mail: otel9m@ism.kiev.ua

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

E-mail: cherviyakov@paton.kiev.ua

It is shown that application of superhard materials based on cubic boron nitride for manufacture of working components of the tool for realization of friction stir welding processes allows ensuring the tool thermomechanical resistance. Computer modeling of the temperature field in the tool, and in steel parts during friction stir welding of stainless steels with a tool based on polycrystalline boron nitride (pcBN) was performed. Agreement between the numerical and experimental results of temperature distribution in the tool movement zone is shown. Strength of welded joints of stainless steel parts was determined, and evolution of weld structure was analysed. 17 Fig., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: structure evolution, friction stir welding, tool, kiborit, strength, modeling, stainless steels, temperature field

Надійшла до редакції 28.06.2023



«SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» – 2023
Каталог учасників виставки
Catalogue/Messekatalog. DVS Media GmbH, Duesseldorf, 2023, 672 p.

З каталогом учасників виставки «SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» (11 – 15 вересня 2023 р., Ессен, Німеччина) можна ознайомитись в редакції журналу «Автоматичне зварювання». Редакція виконує пошук фірм та компаній з каталогу з тематики Замовника.



ДИFUЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МА2-1 ЧЕРЕЗ ПРОМІЖНИЙ ПРОШАРОК З ЦИНКУ

Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, В.Є. Федорчук, В.А. Костін, О.Л. Пузрін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: omega06@ukr.net

У статті представлено результати досліджень з дифузійного зварювання в вакуумі магнієвого сплаву МА2-1. При зварюванні використовували різні технологічні прийоми: зварювання у вільному стані та із застосуванням формуючих матриць, зварювання без прошарків і з прошарком з цинку. Встановлено, що при зварюванні у вільному стані без прошарку за температури 400 °С при тривалості процесу менше 60 хв отримати з'єднання не вдається. Підвищення температури або тривалості зварювання призводить до значного росту зерна. Використання прошарку з цинку товщиною 250 мкм і режиму зварювання: $T = 320$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв дозволяє отримати з'єднання. Аналіз хімічного складу різних ділянок зони з'єднання показує, що внаслідок розвитку дифузійних процесів в стик у процесі зварювання в прошарку з цинку на відстані 2...3 мкм від лінії контакту магній/цинк формуються пори з вмістом магнію на рівні 17,8...20,12 мас. %. У центральній частині зони з'єднання хімічний склад металу близький до складу чистого цинку. Використання при зварюванні на режимі: $T = 340$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв формуючих матриць і проміжного прошарку з цинку, який знаходиться в твердо-рідкому стані, дозволяє отримати з'єднання без дефектів за рахунок локалізації пластичної деформації в стик. За результатами металографічних досліджень в стик спостерігаються формування спільних зерен та залишків прошарку у вигляді дисперсних часток розміром 15...50 мкм, з хімічним складом Mg-4,53Al-0,20Mn-63,49Zn, мас. %, які мають витягнуту неправильну форму. Бібліогр. 17, рис. 4.

Ключові слова: дифузійне зварювання в вакуумі, магнієвий сплав, проміжний прошарок, мікроструктура, мікротвердість

Вступ. Магній є одним з найбільш поширених елементів у земній корі. Він є найлегшим з усіх конструкційних металів. Його щільність 1,74 г/см³ учетверо нижча ніж у сталі і на третину – ніж у алюмінію. Завдяки низькій щільності та високим питомим механічним властивостям застосування магнію набуває все більшого поширення в різних сферах промисловості, таких як автомобілебудування (рульові колеса, каркаси сидінь, корпуси рульової колонки, корпуси подушки безпеки водія, керма тощо), аерокосмічна промисловість (деталі коробки передач турбовентиляторного двигуна, корпус компресора двигуна, корпус трансмісії тощо), медицина (імпланти), електронне обладнання (корпуси мобільних телефонів, комп'ютерів, ноутбуків, фотокамер і портативних медіаплеєрів), спорт (рукоятки луків для стрільби з лука, тенісні ракетки, ключки для гольфу, велосипедні рами і шасі роликів ковзанів) ручний інструмент (корпуси ланцюгових пилок, корпуси редукторів і двигунів ручних інструментів, ручки ручних ножиць і ручних дрилів) [1, 2].

Суттєве збільшення виробництва магнію та його сплавів вимагає розробки ефективних методів з'єднання. Відомо, що зварювання плавленням призводить до розміцнення магнієвих сплавів у зоні з'єднання, формування швів з крупнокристалічною структурою та супроводжуються появою пор, мікротріщин оксидних плівок і тріщини,

утворення яких спричинене розплавленням і наступною кристалізацією металу [3, 4].

Дифузійне зварювання в цьому плані є привабливою технологією, так як дозволяє уникнути утворення дефектів, які часто виникають при застосуванні способів зварювання плавленням. Відповідно до літературних джерел при зварюванні без проміжних прошарків за температури нижчій за 420 °С дифузійні процеси в стик ідуть загальмовано, чітко проглядається лінія контакту; міцність на зріз таких зразків низька. Застосування вищої температури (450...490 °С) у поєднанні з більшою тривалістю зварювання (90...120 хв) призводить до надлишкового росту зерна і, як наслідок, падіння механічних властивостей з'єднань [5, 6].

Використання проміжних прошарків дозволяє отримати бездефектні з'єднання, проте температура зварювання при цьому залишається високою. Так, зварювання через прошарок зі срібла виконують при 480...500 °С [7, 8], міді – при 480...530 °С [9, 10], нікелю – при 515...520 °С [11, 12].

Наведені приклади вказують на необхідність застосування проміжних прошарків, які б наряду з активацією поверхонь дозволяли проводити процес при нижчих температурах. До таких перспективних матеріалів можна віднести прошарки з чистого цинку.

Метою досліджень було встановлення впливу прошарку з цинку при дифузійному зварюванні

Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Петрушинець Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>, Федорчук В.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0003-0625-2113>, Пузрін О.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

© Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, В.Є. Федорчук, В.А. Костін, О.Л. Пузрін, 2023

магнієвого сплаву МА2-1 на формування структури та властивостей зварних з'єднань.

Матеріали та методика. Дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) магнієвого сплаву МА2-1 ($\text{Mg} - 3,8-5,0 \text{ Al} - 0,8-1,5 \text{ Zn} - 0,3-0,7 \text{ Mn}$, мас. % [13]) проводили в установці П-115 при температурі 250...560 °С, тиску 10 МПа, тривалості процесу 15...60 хв, вакуум у камері підтримували на рівні $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Зварювання пластин розміром $15 \times 10 \times 1,5$ мм проводили, як у вільному стані, так із використанням формуючих матриць. Зварювання у вільному стані передбачає вільну деформацію зразків в процесі термо-деформаційного циклу зварювання. При цій схемі зварювання відбувається деформація всього зразка. При зварюванні з використанням формуючих матриць (примусове деформування) забезпечуються умови для локалізації пластичної деформації в зоні з'єднання зразків. Оксидну плівку з контактних поверхонь зразків видаляли шляхом механічної зачистки шабером, після чого їх знежирювали в етиловому спирті. В якості проміжного прошарку використовували фольгу з чистого цинку товщиною 250 мкм.

Дослідження мікроструктури зварних з'єднань проводили на поперечних шліфах на металографічному оптичному мікроскопі «Neophot-32» та скануючому електронному мікроскопу JEOL JSM-840 у режимі вторинних електронів (SEI). Електронний мікроскоп оснащено комбінованою системою енергодисперсійного мікроаналізу INCA PentaFet x3. Підготовка шліфів проводилась за стандартною методикою на високошвидкісних полірувальних кругах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Полірування зразків проводили до 14 класу чистоти поверхні. Розмір зерна визначали лінійним методом, за допомогою окуляр-мікромметра, використовуючи від 10 до 20 полів зору. Твердість фазових складових вимірювали за методом Віккерса на твердомірі М-400, фірми «Лесо». Навантаження складало 1Н (100 гр), час прикладення навантаження 10 с.

Результати та їх обговорення. Сплав МА2-1 у вихідному стані має волокнисту структуру з не-

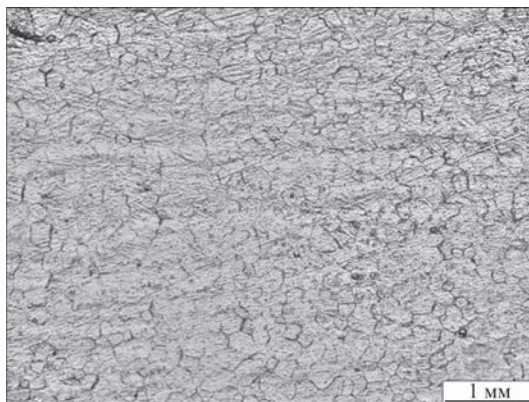


Рис. 1. Мікроструктура сплаву МА2-1 у вихідному стані

рівномірним розподілом зерен за розмірами. В структурі металу переважають зерна з розміром 22...25 мкм, але спостерігаються окремі ділянки з розміром зерна 10...15 мкм (рис. 1). Згідно наукових джерел структура зерен являє собою α -твердий розчин [14]. Границі зерен потовщені, вірогідно, вздовж них виділяється вторинна фаза ($\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ або Mg_4Al_3) [15]. У центральній частині зразка зберігаються сліди текстури прокату. В результаті хімічної неоднорідності матеріалу в центрі зразка спостерігається невелика ділянка з темними виділеннями. Розподіл твердості по площині шліфа має досить неоднорідний характер: на ділянці з хімічною неоднорідністю вона становить 501...591 МПа, в центрі без виділень – 451...453 МПа, по краях зразка, на відстані 100...150 мкм від кромки – 473...507 МПа.

Проведено експерименти з дифузійного зварювання в вакуумі сплаву МА2-1 у вільному стані без використання проміжних прошарків. Показано, що при тривалості зварювання менше 60 хв за температури 400 °С, отримати з'єднання не вдається: руйнування зразків відбувається на стадії підготовки шліфів. Варто відзначити, що при тривалості процесу 15 хв, взаємодія між контактними поверхнями зразків була відсутня. Зі збільшення часу витримки між поверхнями, що зварювались починали спостерігатись окремі ділянки схоплювання (рис. 2, а). Розмір зерен при цьому переважно становить 35...100 мкм, присутні окре-

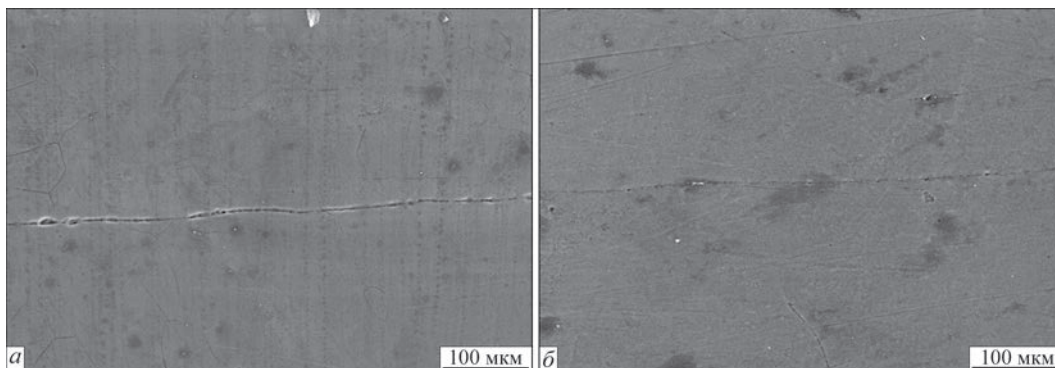


Рис. 2. Мікроструктура зони з'єднання МА2-1 + МА2-1, отриманого ДЗВ на режимі: а – $T = 400$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 60$ хв; б – $T = 560$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 15$ хв

мі зерна розміром 200...320 мкм. Мікротвердість матеріалу коливається в діапазоні 438...566 МПа, при цьому на лінії з'єднання її значення становить 502 МПа.

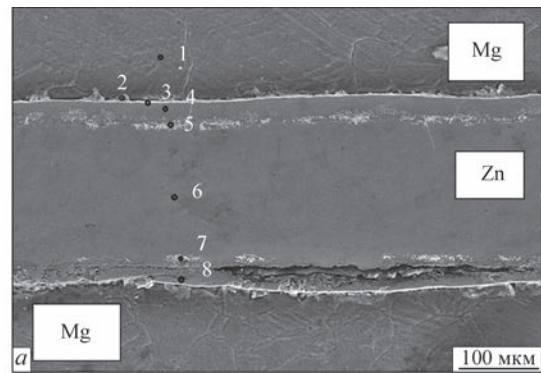
Підвищення температури зварювання навіть до 560 °С не дозволяє отримати якісні з'єднання (рис. 2, б). Після термо-деформаційного циклу зварювання переважним розміром зерен для сплаву МА2-1 є 150...350 мкм, спостерігаються окремі скупчення зерен розміром 60...100 мкм та поодинокі зерна, що проростають на всю товщину зразка. Необхідно відмітити помітну деградацію металу з'єднань: після високотемпературного впливу режиму зварювання внаслідок інтенсивного росту зерен відбувається крихке руйнування магнієвого сплаву. Мікротвердість таких з'єднань має більш однорідний характер і змінюється від 371 МПа в зоні з'єднання до 458 МПа ближче до зовнішніх меж зразка. Це можна пояснити повним проходженням процесу рекристалізації та зникненням слідів текстури з одночасним вирівнюванням хімічного складу.

Відомо, що використання проміжних прошарків при дифузійному зварюванні дозволяє локалізувати пластичну деформацію в стику [16]. Тому в подальших дослідженнях використовували проміжні прошарки у вигляді фольги.

В якості прошарку було обрано цинк товщиною 250 мкм. Використання цинку дозволяє суттєво знизити температуру процесу до 320 °С. Згідно з діаграмою рівноважного стану в системі магній–цинк спостерігається декілька евтектичних реакцій при температурі 340 та 368 °С. Підвищення температури зварювання до температури більшої за евтектичну реакцію призводить до плавлення компонентів та проникнення цинку на всю товщину зразка наслідком чого є подальше крихке руйнування зразка. Зварювання при більш низьких температурах 250...300 °С не забезпечує умови для формування з'єднання.

На рис. 3 представлена мікроструктура (а) і хімічний склад (б) зони з'єднання зразків отриманих на режимі: $T = 320$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв.

Після зварювання товщина прошарку дорівнює ~200 мкм. На основі результатів металографічних досліджень можна зробити висновок, що зварювання магнію з магнієм з використанням прошарку з цинку є досить перспективним, так як дозволяє отримати з'єднання при відносно низьких температурах. Однак, треба зазначити, що в зоні з'єднання з двох сторін від прошарку внаслідок незбалансованих дифузійних потоків між прошарком і основним матеріалом формується ланцюжок поздовжніх пор. Аналіз хімічного складу різних ділянок зони з'єднання показує, що пори формуються в прошарку з цинку на відстані 2...3 мкм



Номер спектру	Вміст елементів, мас. %			
	Mg	Al	Mn	Zn
1	99,39	–	0,09	0,52
2	66,41	0,91	0,21	32,47
3	62,06	1,14	0,28	36,52
4	20,12	–	–	79,88
5	3,27	0,15	0,31	96,27
6	2,26	–	–	97,74
7	–	–	0,10	99,90
8	17,80	–	–	82,13

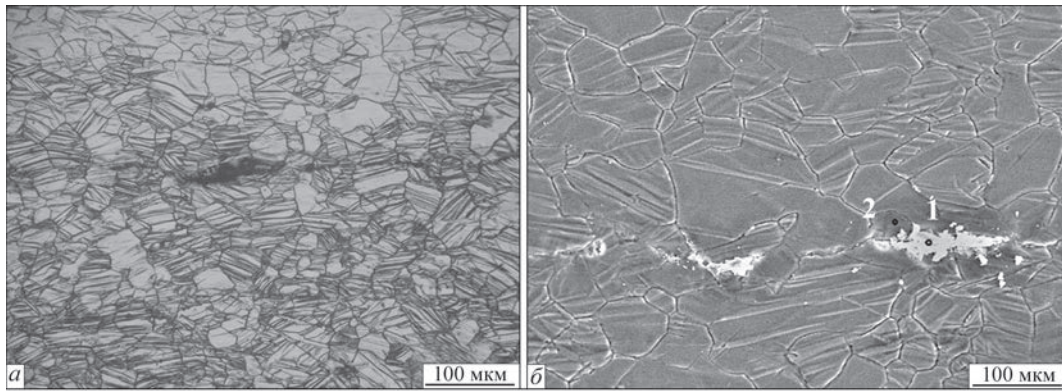
Рис. 3. Мікроструктура (а) і хімічний склад (б) зони з'єднання МА2-1 + Zn + МА2-1, отриманого ДЗВ на режимі: $T = 320$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв

від лінії контакту магній/цинк з вмістом магнію на рівні 17,8...20,12 мас. %, що відповідає фазі $MgZn_2$ [17]. У центральній частині зони з'єднання (точка б) хімічний склад металу близький до складу чистого цинку ($Zn - 2,26Mg$, мас. %).

У структурі металу виявлена різнозернистість з великою кількістю двійників які розташовуються на відстані 500 мкм від шву у глиб металу з більш дрібним зерном 30...100 мкм. На більшій глибині зерна мають розмір 100...200 мкм з поодинокими двійниками. Мікротвердість з'єднання має досить однорідний характер окрім ділянок, в яких сформувалась фаза $MgZn_2$, тут відбувається підвищення мікротвердості до 580 МПа, проти 330...458 МПа для інших ділянок зразка.

Подальші дослідження проводили при зварюванні в формуючих матрицях, які забезпечують локалізацію пластичної деформації в зоні з'єднання зразків в процесі термо-деформаційного циклу зварювання. На рис. 4 представлена мікроструктура (а, б) і хімічний склад (в) зони з'єднання зразків отриманих в формуючих матрицях на режимі: $T = 340$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв.

У даному випадку відбувається практично повне видалення цинку зі стику. Причиною цього є проходження процесу зварювання в твердо-рідкому стані. Як показує аналіз мікроструктури в стику відбувається проростання через зону з'єднання спільних зерен, що свідчить про активне протікання дифузійних процесів. У стику спостерігаються окремі дисперсні включення неправильної



Номер спектру	Вміст елементів, мас. %			
	Mg	Al	Mn	Zn
1	31,77	4,53	0,20	63,49
2	98,71	2,51	0,06	1,72

Рис. 4. Мікроструктура (а) і хімічний склад (б) зони з'єднання MA2-1 + Zn + MA2-1, отриманого ДЗВ в формуючих матрицях на режимі: $T = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 30\text{ хв}$

форми спрямовані в напрямку течії металу. Розмір включень становить 15...50 мкм. Білі включення на рис. 4, б відповідно до [17] являють собою фазу $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$. Середній розмір зерен в магнієвому сплаві переважно складає 15...60 мкм, з окремими зернами до 200 мкм. Мікротвердість вздовж зони з'єднання має неоднорідний характер і змінюється в діапазоні 594...660 та 330...479 МПа для ділянок з включеннями фази $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$ і без неї відповідно. Можна припустити, що такий розподіл мікротвердості не нестиме негативний вплив на механічні властивості з'єднання, так як інтерметалідні включення мають дисперсний характер. Мікротвердість в основному металі становить 371... 526 МПа. Проведено оцінку міцності з'єднань на згин, яка показала, що кут згину зразків з прошарком з цинку, отриманих дифузійним зварюванням в формуючих матрицях, становить 180° , на відміну від зразків отриманих без використання проміжного прошарку, руйнування яких відбувається на стадії підготовки шліфів.

Висновки

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що при дифузійному зварюванні в вакуумі сплаву MA2-1 без використання проміжних прошарків отримати якісні з'єднання утруднено.

Проведення зварювання на режимі: $T = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 30\text{ хв}$, – з використанням формуючих матриць і проміжного прошарку з цинку, який знаходиться в твердо-рідкому стані, дозволяє отримати з'єднання без дефектів. За результатами металографічних досліджень в стикі спостерігаються утворення спільних зерен і практично повне видалення прошарку з формуванням витягнутих вздовж лінії з'єднання дис-

персних часток розміром 15...50 мкм з хімічним складом $\text{Mg}-4,53\text{Al}-0,20\text{Mn}-63,49\text{Zn}$, мас. %. Природа і детальне пояснення механізму формування з'єднань через прошарок, що знаходиться в твердо-рідкому стані, під дією локальної пластичної деформації в стикі потребує подальших досліджень.

Список літератури/References

- Manoj Gupta, Nai Mui Ling Sharon (2011) *Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- Gialanella S., Malandrucolo, A. (2020) *Aerospace Alloys*. Springer, Cham.
- Min, D., Shen, J., Lai, S., et. al. (2009). Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates. *Materials Characterization*, 60 (12), 1583–1590. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.09.010>
- Abbas, M., Khan, A., Ali, M. et. al. (2014) Effect of weld current and weld speed on the microstructure and tensile properties of magnesium alloy specimens during tungsten inert gas. *Technical J.*, 19 (II), 35–39.
- Fei, Lin, Tiepeng, Li, Lulu, Sun, Qingsen, Meng. (2012) A study on vacuum diffusion bonding of as-extruded AZ31 magnesium alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 121–126 (10–14). DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.10>
- Fei, Lin, Jie, Li, Hongwei, Zhao et. al. (2013) Experimental Research on Vacuum Diffusion Bonding of As-extruded AZ61 Magnesium Alloy. *Advanced Materials Research*, 788, 34–37. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.788.34>
- Zhang, Weixiang, Du, Shuangmin (2013) Investigation into Cu-interlayered Diffusion Bonding Trial of AZ31B Alloy. *Advanced Materials Research*, 631–632 (167–171). DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.167>
- Torun, O., Karabulut, A., Baksan, B. et. al. (2008) Diffusion bonding of AZ91 using a silver interlayer. *Materials and Design*, 29, 2043–2046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.003>
- Reza, Ghavami, Ayoub, Halvae, Amir, Hadian (2019) Effect of bonding temperature on interface properties of AZ31 magnesium alloys joined by transient liquid phase using silver interlayer. *Materials Research Express*, 6, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab44df>
- Sun, D.Q., Liu, W.H., Gu, X.Y. (2004) Transient liquid phase bonding of magnesium alloy (Mg–3Al–1Zn) using copper inter-

- layer. *Materials Science and Technology*, **20** (12), 1595–1598. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328413X13789824293506>
11. Jin, Y.J., Khan, T.I. (2012) Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded magnesium AZ31 alloy. *Materials and Design*, **38**, 32–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.039>
 12. AlHaza, A.N., Khalil Abdelrazek Khalil, Muhammad A. Shar (2016) Transient liquid phase bonding of magnesium alloys AZ31 using nickel coatings and high frequency induction heat sintering. *J. of King Saud University Science*, **28**, 152–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.09.006>
 13. ГОСТ 14957-76 Сплавы магниевые деформируемые. Марки. *GOST 14957-76 Wrought magnesium alloys. Grades [in Russian]*.
 14. Морозова Г.И. (2008) Фазовый состав и коррозионная стойкость магниевых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **3**, 8–12.
 15. Morozova, G.I. (2008) Phase composition and corrosion resistance of magnesium alloys. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **3**, 8–12 [in Russian].
 16. Shi, Z.Z., Zhang, W.Z. (2013) Prediction of the morphology of $Mg_{32}(Al, Zn)_{40}$ precipitates in a Mg–Zn–Al alloy. *Intermetallics*, **39**, 34–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.02.023>
 17. Piskun, N.V., Falchenko, Yu.V., Petrushinets, L.V. (2020) Formation of the structure and mechanical properties of joints of TiAlNb intermetallic alloy in diffusion welding. *The Paton Welding J.*, **2**, 2–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.02.01>
 18. Okamoto, H. (1994) Comment on Mg–Zn (magnesium-zinc). *J. of Phase Equilibria*, **15**, 129–130. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF0266770>

DIFFUSION WELDING OF MAGNESIUM ALLOY MA2-1 THROUGH A ZINC INTERLAYER

Yu.V. Fachenko, L.V. Petrushynets, V.Ie. Fedorchuk, V.A. Kostin, O.L. Puzrin

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

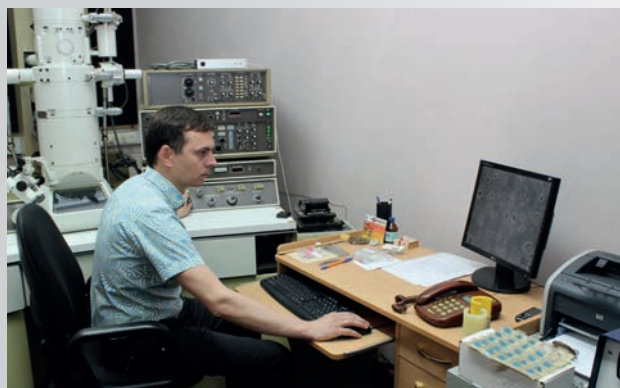
E-mail: omega06@ukr.net

The paper gives the results of investigations on vacuum diffusion welding of MA2-1 magnesium alloy. Different technological measures were used in welding: unsupported welding, welding with application of forming matrices, welding without interlayers and with a zinc interlayer. It is found that it is not possible to produce the joint in unsupported welding without an interlayer at 400 °C temperature and process duration less than 60 min. Increase of welding temperature or time leads to considerable grain growth. Application of 250 ~m zinc interlayer and of the following welding mode: $T = 320$ °C, $P = 10$ MPa, $t = 30$ min allows producing the joint. Analysis of chemical composition in different areas of the joint zone shows that development of diffusion processes in the butt during welding results in pore formation with magnesium content on the level of 17.8 – 20.12 wt. % in the zinc interlayer at 2 – 3 ~m distance from magnesium/zinc contact line. In the central part of the joint zone the metal chemical composition is close to pure zinc composition. Application of forming matrices and an interlayer of zinc in the solid-liquid state in welding in the following mode: $T = 340$ °C, $P = 10$ MPa, $t = 30$ min. allows producing sound joints due to localisation of plastic deformation in the butt joint. Results of metallographic investigations showed formation in the butt joint of common grains and remains of the interlayer in the form of dispersed particles of 15...50 ~m size, with chemical composition of Mg-4.53Al-0.20Mn-63.49Zn, wt. %, having an irregular elongated shape.

Keywords: vacuum diffusion welding, magnesium alloy, interlayer, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 05.07.2023

СТИПЕНДІАТ ВЕРХОВНОЇ РАДИ УКРАЇНИ



Демченко Валерій Леонідович

Доктор хімічних наук, провідний науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, старший науковий співробітник Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України, Лауреат державної Премії України в галузі науки і техніки.

Валерій Демченко працює у відділі зварювання пластмас, який відомий своїми розробками в галузі 3D друку, матеріалів для 3D друку і споріднених технологій. У 2023 р. Демченко В.Л. от-

римав іменну стипендію Верховної Ради України для молодих учених-докторів наук. Робота присвячена розробці технології 3D друку полімерних виробів з противірусною та антимікробною дією. Сьогодні наукові дослідження та боротьба з вірусними інфекціями, зокрема, з великою групою респіраторних захворювань, зумовлених вірусами, займають важливе місце в сучасній медицині. Також розвиваються стійкі до безлічі антимікробних агентів мікроорганізми (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* (синьогнійна паличка), дріжджоподібні гриби *Candida albicans* та ін.). Отже, сьогодні існує потреба в нових матеріалах з вищою противірусною і бактерицидною дією, меншою токсичністю для людини й довкілля (екології, медицини й харчової промисловості). Робота стипендіата спрямована на розробку технології 3D-друку полімерних виробів на основі біополімеру – полілактиду і біметалічних наночастинок Ag/Cu, Ag/ZnO, Cu/ZnO. Отримана технологія може застосовуватись для 3D друку полімерних виробів різного призначення.

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ НИЗЬКОВОДНЕВИХ АГЛОМЕРОВАНИХ ФЛЮСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАВЛЕНИХ МАТЕРІАЛІВ

І.О. Гончаров, В.В. Головка, А.П. Пальцевич, А.М. Дученко

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

Методом газової хроматографії досліджено термічну десорбцію водню з мінеральних сировинних матеріалів, які використовуються при виробництві зварювальних агломерованих флюсів. Установлено перспективність застосування у складі шихти при виготовленні агломерованих флюсів плавлених матеріалів. Збільшення вмісту плавленого матеріалу у складі шихти агломерованого флюсу приводить до зниження схильності флюсу до сорбування вологи з оточуючої атмосфери. При підвищенні вмісту плавленого напівпродукта в шихті агломерованих флюсів з 15 до 40 % вміст дифузійного водню в наплавленому металі при зварюванні під цими флюсами знижується з 3,5 до 2,6 см³/100 г. Бібліогр.12, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: водень, автоматичне дугове зварювання під агломерованими флюсами, низьколеговані сталі

Вступ. В останні роки все ширше впроваджуються у виробництво металокопункції із високоміцних низьколегованих сталей [1, 2]. При зварюванні високоміцних сталей під впливом термічного циклу в металі можливе утворення структур, які, з одного боку, сприяють значному зміцненню металу, а з іншого – підвищують його схильність до утворення холодних тріщин [3, 4]. Здатність металу опиратися зародженню і розвитку холодних тріщин зростає зі зниженням концентрації в ньому дифузійного водню. Встановлено умови, за яких ризик утворення холодних тріщин у зварних з'єднаннях зводиться до мінімуму. Так, у разі обмеження швидкості охолодження металу в інтервалі температур 600...500 до 10 °C/c, а вмісту дифузійного водню в наплавленому металі до 4 см³/100 г, рівень напружень, який метал зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань зі сталей з вуглецевим еквівалентом $C_e = 0,35...0,45$ % може витримати без утворення холодних тріщин, становить 90 % від його границі плинності [5].

Зважаючи на аналіз змін у вимогах до міцності і пластичності високоміцних низьколегованих сталей переважна більшість авторів приходять до висновку, що виконати ці вимоги при зварюванні під існуючими плавленими флюсами неможливо [6, 7]. Тому безальтернативним є вибір на користь агломерованих флюсів при зварюванні високоміцних сталей. Їх широке впровадження в Україні стримується відсутністю сучасного промислового виробництва. В роботах [8, 9] відзначаючи переваги агломерованих флюсів, автори відзначають і властиві їм недоліки, які визначаються способом їх виготовлення: підвищену схильність до сорбування вологи з оточуючої атмосфери, меншу

міцність гранул флюсу і залежність якості флюсу від якості застосовуваної при його виробництві сировини. Стосовно останнього недоліку необхідне додаткове пояснення. Через відсутність пірметалургійних і високотемпературних процесів у рідкому шлаку при виготовленні агломерованих флюсів неможливо знизити вміст у складі шихтових матеріалів таких шкідливих домішок як сірка, фосфор, структурна волога та органічні сполуки. Зважаючи на підвищений рівень вимог до вмісту шкідливих домішок при зварюванні високоміцних низьколегованих сталей якість агломерованих флюсів значною мірою визначається якістю застосовуваної при їх виробництві сировини. Потрібно для виготовлення агломерованих флюсів високоякісна сировина в Україні або відсутня, або дуже дорога. Це і є причиною того, що в Україні, де були створені перші агломеровані флюси, відсутнє їх промислове виробництво. З іншого боку, при виготовленні плавлених флюсів існують можливості для рафінування розплаву від шкідливих домішок, існує потужне промислове виробництво плавлених флюсів, за обсягами виготовлення яких ще донедавна Україна посідала перше місце в світі. Це створює можливості для розробки нової технології виготовлення агломерованих флюсів, яка базується на використанні плавлених матеріалів. У роботі [10] зроблено висновок про перспективність застосування у шихті при виробництві низьководневих агломерованих флюсів плавлених матеріалів, виготовлених за технологією дуплекс-процесу. Такі напівпродукти мають низький загальний вміст сірки, фосфору та водню. Термічна десорбція водню із них відбувається при температурах до 800 °C.

Гончаров І.О. — <https://orcid.org/0000-0003-2915-0435>, Головка В.В. – <http://orcid.org/0000-0002-2117-0864>,

Пальцевич А.П. – <https://orcid.org/0000-001-8640-7909>

© І.О. Гончаров, В.В. Головка, А.П. Пальцевич, А.М. Дученко, 2023

Метою даної роботи було визначити вплив введення плавлених матеріалів до складу шихти на їх схильність до сорбування вологи з оточуючої атмосфери, вміст дифузійного водню в наплавленому металі при зварюванні під розробленими агломерованими флюсами.

Методики досліджень вмісту водню в сировинних матеріалах та дифузійного водню в наплавленому металі.

Загальний вміст водню в сировинних матеріалах визначали хроматографічним методом, який має високу чутливість стосовно водню й розділову здатність стосовно O_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 , H_2O . [11]. Він дозволяє визначати як загальний вміст водню в досліджуваних матеріалах, так і процес десорбції водню при їх нагріванні до температури 1100 °С.

Вміст дифузійного водню в металі зварних швів визначали методом хроматографічного аналізу за ГОСТ 23338-91 із застосуванням газоаналізатора ОБ 2781П. Температура нагріву зразків становила 150 °С, що дозволяло знизити час вимірювання водню. Об'єктивність результатів вимірювання обсягу дифузійного водню обумовлена тим, що водень, який виділився зі зразка у герметичній металевій камері, вимірюється методом газової хроматографії. Надійність результатів вимірювання вмісту дифузійного водню підтверджена численними порівняльними випробуваннями його зі ртутним методом аналізу за стандартом ISO 3690:2018 [12].

Зразки для аналізу вмісту дифузійного водню в наплавленому металі одержували методом наплавлення валика на складаний зразок зі сталі 10Г2ФБ зі застосуванням зварювального дроту марки Св-10Г1НМА на постійному струмі зворотної полярності на режимі: $I_{зв} = 550...600$ А, $U_d = 32...34$ В, $V_{зв} = 36$ м/год. Підготовку зразків і визначення вмісту дифузійного водню в наплавленому металі здійснювали за ISO 3690:2018.

Дослідження вмісту водню в сировинних матеріалах для виробництва агломерованих флюсів. Технологія виробництва агломерованих флюсів, на відміну від технології виготовлення плавлених флюсів, має обмежені можливості стосовно зниження вмісту в них водню. Сировинні матеріали є основним джерелом надходження водню при виготовленні зварювальних агломерованих флюсів. Тому важливо використовувати нетрадиційні сировинні матеріали, в яких вміст водню обме-

жений. Проведений аналіз відходів промислових підприємств України показав, що найбільш придатним для виробництва флюсів є шлак гранульований виробництва силікомарганцю та шлакова кірка, яка утворюється при зварюванні труб великого діаметру. Їх склади наведені в табл. 1.

Ці матеріали є переплавленими продуктами і містять незначну кількість водню, а саме: шлакова кірка – 25 $см^3/100$ г, а шлак гранульований виробництва силікомарганцю – 198 $см^3/100$ г, причому водень знаходиться в них у формі абсорбованої на поверхні вологи, яка легко видаляється прокалюванням при температурі до 300 °С.

Проведено аналіз вмісту водню в сировинних матеріалах, які можуть бути використані при виготовленні агломерованих флюсів для зварювання. Дослідження показали, що вміст водню в глиноземі Г-ОО становить понад 1500 $см^3/100$ г, а в периклазі – 6300 $см^3/100$ г. Зважаючи на високий вміст водню в цих матеріалах було досліджено вміст водню в інших матеріалах, що містять оксиди магнію та алюмінію. Зокрема, проведені дослідження показали, що вміст водню в корунді білому марки 25А становить 92 $см^3/100$ г, а в периклазовому порошку для електропечей ППЕ-88 – 1156 $см^3/100$ г. Такий рівень водню в матеріалах є критичним з точки зору можливості їх використання при виготовленні агломерованих флюсів. Тому був досліджений вплив термічної обробки сировинних матеріалів на вміст в них водню. Також було виконано термогравіметричний і диференційний термічний аналіз вказаних матеріалів в діапазоні з 20 до 1000 °С. Таке дослідження виконували на повітрі і його метою було визначити чи не буде одночасно зі десорбцією водню із сировинних матеріалів при їх прокалюванні відбуватися їх небажане окиснення. Встановлено, що для нижченаведених сировинних матеріалів оптимальною є їх термообробка при 900 °С, яка дозволяє знизити вміст водню у кварцовому піску – з 240 до 15 $см^3/100$ г, в корунді білому марки 25А – з 92 до 10 $см^3/100$ г, в флюоритовому концентраті – з 340 до 10...15 $см^3/100$ г, в периклазовому порошку для електропечей ППЕ-88 з 1156 до 10...15 $см^3/100$ г, в плавленому флюсі – з 60 до 10...15 $см^3/100$ г. Запропоновано проводити прокалювання шихтових матеріалів для виробництва агломерованих флюсів перед грануляцією при температурі 900 °С впродовж 1 год.

Таблиця 1. Хімічний склад шлаку гранульованого виробництва силікомарганцю та шлакової кірки зварювального флюсу АН-60

Назва матеріалу	Хімічний склад, мас. %									
	SiO ₂	MnO	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	P ₂ O ₅	SO ₂	Решта
Шлак виробництва силікомарганцю	48,0	20,0	–	14,0	8,0	5,0	0,3	0,008	1,0	3,7
Шлакова корка флюсу АН-60	40,0	35,0	7,0	8,0	4,0	2,0	4,0	–	–	–

Зрозуміло, що високотемпературне прокалювання сировинних компонентів при виготовленні агломерованих флюсів досить енергоємне. Дослідження переплавлених продуктів – шлакової кірки і шлаку виробництва силікомарганцю, показало, що вони мають низький загальний вміст водню і меншу (до 300 °С) температуру видалення сполук, що містять водень. Тому перспективним є використання плавлених матеріалів, в тому числі виготовлених за технологією дуплекс-процесу, в шихті агломерованих флюсів для обмеження вмісту в них водню.

Дослідження схильності до сорбування вологи з оточуючого повітря агломерованими флюсами, що містять в складі шихти плавлені напівпродукти.

Технологія виготовлення агломерованих флюсів побудована на незворотності процесу дегідратації рідкоскляної складової під час термічної обробки флюсу. Кінцевим продуктом дегідратації рідкого скла є міцна, щільна й вологостійка силікатна плівка, що має певну стійкість проти поглинання атмосферної вологи. Тип рідкого скла суттєво впливає на схильність агломерованого флюсу до сорбування вологи (рис. 1).

Оцінку кінетики сорбційного вологопоглинання флюсів визначали в ході експериментів, у ході яких навески флюсів, прожарених перед дослідом при температурі 400 °С впродовж 2 год, витримували в ексикаторі з постійною вологістю 77,6 % і при температурі $22 \pm 0,5$ °С. Найнижчі показники сорбуючої здатності показали агломеровані флюси на основі Na-K рідкого скла.

Були виготовлені дослідні агломеровані флюси системи $MgO-Al_2O_3-SiO_2-CaF_2-TiO_2-ZrO_2$, які відрізнялися вмістом плавленого матеріалу в своєму складі. В якості плавленого матеріалу брали відсів флюсу АН-47 за ГОСТ 9087, виготовлено-го методом дуплекс-процесу.

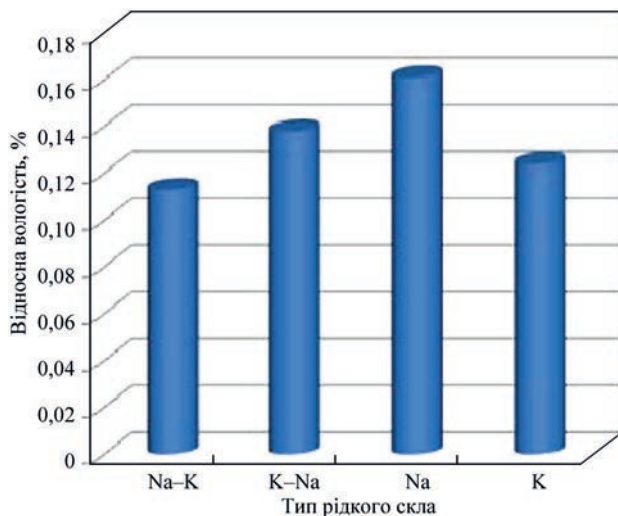


Рис. 1. Вплив типу рідкого скла в шихті агломерованих флюсів на їхню схильність до вологопоглинання

Встановлено, що підвищення до 45 % в складі шихти агломерованих флюсів вмісту плавлених матеріалів, які мають, на наш погляд, меншу питому поверхню у порівнянні зі традиційними сировинними матеріалами, приводить до зниження необхідної для формування гранул кількості зв'язуючої речовини з 30 до 15 % (рис. 2).

Вміст сухого залишку рідкого скла в значній мірі визначає схильність агломерованого флюсу до вологопоглинання. Це підтверджується результатами порівняльних досліджень флюсів плавлених і агломерованих на основі мінеральних сировинних матеріалів з різним вмістом плавлених матеріалів (рис. 3).

Збільшення вмісту плавленого матеріалу до 45 % приводить до зниження сорбуючої здатності флюсу на 46 % і за цим показником такий флюс

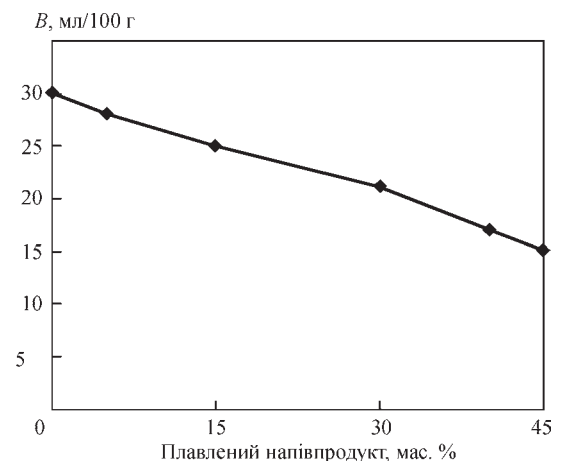


Рис. 2. Залежність витрати рідкого скла при гранулюванні агломерованого флюсу від вмісту плавленого матеріалу

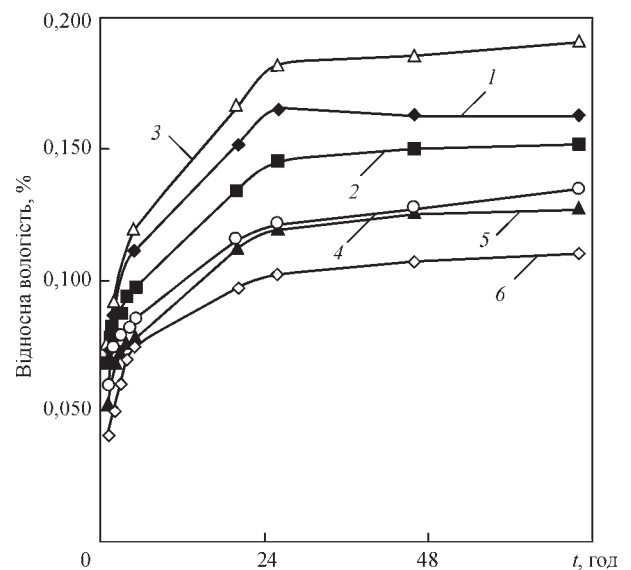


Рис. 3. Вплив вмісту плавленого матеріалу та технології виробництва зварювальних флюсів на їхню схильність до сорбування вологи з атмосфери: 1 – 15 % плавленого матеріалу; 2 – 30 % плавленого матеріалу; 3 – агломерований алюмінат основний; 4 – плавлений пемзоподібний марганець силікатний; 5 – 45 % плавленого матеріалу; 6 – плавлений скловидний марганець силікатний

Таблиця 2. Вплив вмісту плавленого матеріалу в складі агломерованого флюсу на вміст дифузійного водню в наплавленому металі

Номер	Вміст плавленого напівпродукту в складі шихти агломерованого флюсу, %	Вміст дифузійного водню $[H]_{\text{диф.напл.метал}}$ $\text{см}^3/100 \text{ г}$
1	15	3,2; 3,9; 3,5
2	40	2,6; 2,7; 2,3

близький до плавленого флюсу зі скловидною будовою зерен і переважає агломеровані алюмінатні основні флюси, виготовлені за традиційною технологією. В нашому дослідженні для порівняння використовували агломерований флюс ОР-132 фірми «Oerlikon», плавлені марганець-силікатні флюси з пемзоподібною (АН-60) і скловидною (АН-348А) будовою зерен.

Дослідження вмісту дифузійного водню в наплавленому металі при зварюванні під агломерованими флюсами.

Досліджено вміст дифузійного водню в наплавленому металі при зварюванні під агломерованими флюсами системи $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2-\text{TiO}_2-\text{ZrO}_2$, які відрізнялися вмістом плавленого матеріалу в своєму складі. В якості плавленого матеріалу брали відсів флюсу АН-47 за ГОСТ 9087, виготовленого методом дуплекс-процесу.

Результати досліджень наведені в табл. 2.

З табл. 2 видно, що збільшення вмісту плавленого матеріалу у складі шихти з 15 до 40 % приводить до зниження вмісту $[H]_{\text{диф.напл.метал}}$ нижче $3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Згідно запропонованої Міжнародним інститутом зварювання класифікації при рівні $[H]_{\text{диф.напл.метал}}$ менше $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ зварювальні електроди вважаються такими, що забезпечують дуже низький вміст дифузійного водню в наплавленому металі [11]. Сучасні агломеровані флюси провідних світових фірм-виробників забезпечують $[H]_{\text{диф.напл.метал}}$ до $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Тому можна вважати, що агломеровані флюси, в складі шихти яких застосовуються плавлені напівпродукти, виготовлені методом дуплекс-процесу, забезпечують гранично низький вміст дифузійного водню в наплавленому металі.

Висновки

1. Методом газової хроматографії досліджено загальний вміст водню в мінеральних сировинних матеріалах, які використовуються при виробництві агломерованих зварювальних флюсів. Запропоновано проводити прокалювання шихтових матеріалів для виробництва агломерованих флюсів перед грануляцією при температурі $900 \text{ }^\circ\text{C}$ впродовж 1 год. Встановлено перспективність застосування у складі шихти відходів промислових підприємств України, які є переплавленими продуктами і містять незначну кількість водню, а саме: шлакової кірки зварювального плавленого флюсу АН-60 ($25 \text{ см}^3/100 \text{ г}$) та шлаку гранульова-

ного виробництва силікомарганцю ($198 \text{ см}^3/100 \text{ г}$). Визначено, що водень в цих матеріалах знаходиться в них у формі абсорбованої на поверхні вологи, яка легко видаляється прокалюванням при температурі до $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Встановлено, що підвищення вмісту плавлених матеріалів в складі шихти агломерованих флюсів до 45 % приводить до зниження необхідної для формування гранул флюсу кількості зв'язуючої речовини з 30 до 15 %.

3. Підвищення вмісту плавленого матеріалу в складі шихти агломерованих флюсів до 45 % приводить до зниження сорбуючої здатності флюсами на 46 % і за цим показником такі флюси близькі до плавлених флюсів зі скловидною будовою зерен і переважають агломеровані алюмінатні основні флюси, виготовлені за традиційною технологією.

4. При збільшенні вмісту плавленого матеріалу у складі шихти агломерованого флюсу з 15 до 40 % вміст дифузійного водню в наплавленому металі при зварюванні під агломерованими флюсами знижується з 3,5 до $2,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

Список літератури

- Morrison, W.B. (2000) *Past and future development of HSLA steels. HSLA steels*. Beijing The metallurgical Industry Press.
- Komizo, Yu-ichi. (2006) Progress in structural steels for bridge and linepipe. *Transactions of JWRI*, 1, 1–7.
- Позняков В.Д. (2023) *Зварювальні технології для ремонту металевих конструкцій*, Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України.
- Tianli, Zhang, Zhuoxin, Li, Frank, Young et. al. (2014) Global Progress on Welding Consumables for HSLA Steel. *ISIJ International*, 8, 1472–1484.
- Позняков В.Д. (2017) Технології зварювання для виготовлення і ремонту металевих конструкцій із високоміцних сталей. *Вісник Національної академії наук України*, 1, 64–72.
- Головко В.В., Потапов Н.Н. (2010) Особенности агломерированных (керамических) флюсов при сварке. *Сварочное производство*, 6, 29–34.
- Походня И.К. (2003) Сварочные материалы: состояние и тенденции развития. *Сварочное производство*, 6, 26–40.
- Бублик О.В. (2009) Преимущества и недостатки керамических (агломерированных) флюсов по сравнению с плавленными флюсами аналогичного назначения. *Сварочное производство*, 2, 27–30.
- Головко В.В. (2012) Агломерированные флюсы в отечественном сварочном производстве (обзор). *Автомат. сварка*, 2, 38–41.
- Гончаров І.О., Головко В.В., Пальцевич А.П. та ін. (2023) Вдосконалення технології виготовлення низьководневих плавлених флюсів. *Автомат. зварювання*, 7, 48–53.
- Походня І.К., Явдошин І.Р., Пальцевич А.П. та ін. (2004) *Металургія дугового зварювання. Взаємодія металу з газами*. Київ, Наукова думка.
- ISO 3690:2018 *Welding and allied processes – Determination of hydrogen content in arc weld metal*.

References

- Morrison, W.B. (2000) *Past and future development of HSLA steels. HSLA steels*. Beijing The Metallurgical Industry Press.
- Komizo, Yu-ichi. (2006) Progress in structural steels for bridge and pipeline. *Transact. of JWRI*, **1**, 1–7.
- Poznyakov, V.D. (2023) *Welding technologies for repair of metal structures*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
- Tianli, Zhang, Zhuoxin, Li, Frank, Young et. al. (2014) Global progress on welding consumables for HSLA steel. *ISIJ Intern.*, **8**, 1472–1484.
- Poznyakov, V.D. (2017) Welding technologies for production and repair of metal structures from high-strength steels. *Visnyk NANU*, **1**, 64–72 [in Ukrainian].
- Golovko, V.V., Potapov, N.N. (2010) Peculiarities of agglomerated (ceramic) fluxes in welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 29–34 [in Russian].
- Pokhodnya, I.K. (2003) Welding consumables: State-of-the-art and tendencies of development. *Ibid.*, **6**, 26–40 [in Russian].
- Bublik, O.V. (2009) Advantages and disadvantages of agglomerated (ceramic) fluxes in comparison with the fused fluxes of identical purpose. *Ibid.*, **2**, 27–30 [in Russian].
- Golovko, V.V. (2012) Agglomerated fluxes in local welding production (Review). *The Paton Welding J.*, **2**, 33-35.
- Goncharov, I.O., Holovko, V.V., Paltsevych, A.P. et al (2023) Technologies for producing low-hydrogen fused fluxes. *The Paton Welding J.*, **7**, 37-42.
- Pokhodnya, I.K., Yavdoshchyn, I.R., Paltsevych, A.P. et al. (2004) *Metallurgy of arc welding. Interaction of metals with gases*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- ISO 3690:2018 *Welding and allied processes – Determination of hydrogen content in arc weld metal*.

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING LOW-HYDROGEN AGGLOMERATED FLUXES USING FUSED MATERIALS

I.O. Goncharov, V.V. Holovko, A.P. Paltsevych, A.M. Duchenko

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

Gas chromatography method was used to study thermal desorption of hydrogen from mineral raw materials, used in manufacture of agglomerated welding fluxes. The good prospects for application of fused materials in the charge composition in agglomerated flux manufacture were established. Increase of fused material content in the composition of agglomerated flux charge leads to lowering of the flux susceptibility to sorption of environmental moisture. At increase of the content of fused material in the agglomerated flux charge from 15 up to 40% the diffusible hydrogen content in the deposited metal decreases from 3.5 to 2.6 cm³/100 g in submerged-arc welding with these fluxes. 12 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: hydrogen, automatic arc welding with agglomerated fluxes, low-alloy steels

Надійшла до редакції 19.06.2023

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Товариство зварників України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Конференція присвячена 105-й річниці від дня народження академіка Бориса Патона
м. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 27 листопада 2023 р.

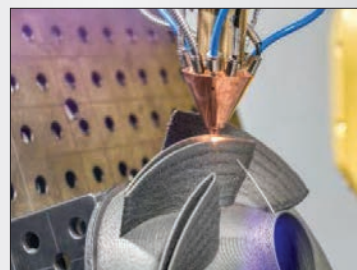
Тематика конференції

- ♦ адитивні технології, що базуються на зварювальних, металургійних та гібридних процесах;
- ♦ електронно-променеві технології в галузі адитивних технологій;
- ♦ 3D друк;
- ♦ селективне лазерне плавлення;
- ♦ плазмово-порошкове наплавлення;
- ♦ математичне моделювання фізичних процесів в адитивних технологіях;
- ♦ матеріали для адитивних технологій;
- ♦ адитивні технології при виготовленні деталей із пластмас та виробів медичного призначення;
- ♦ матеріалознавство в галузі адитивних технологій;
- ♦ неруйнівний контроль в галузі адитивних технологій.

Робочі мови: українська, англійська.

Адреса для листування

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150, тел./факс: (38044) 205-23-90.
E-mail: journal@paton.kiev.ua, www.pwi-scientists.com/ukr/at2023



Виставка

Під час роботи конференції в корпусі № 4 ІЕЗ ім. Є.О. Патона буде проведена виставка «Зварювання та споріднені технології».

Час роботи виставки:

27 листопада з 10:00 до 16:00.

Умови участі у виставці оговорюються окремо.

Контрольні дати

Подання заявок та тез доповідей: до 07.11.2023

Подання заявок без доповіді: до 21.11.2023

Розсилка програми: до 22.11.2023

Оплата організаційного внеску: до 27.11.2023

ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ, НАПИЛЕНИХ БАГАТОКАМЕРНИМ ДЕТОНАЦІЙНИМ ПРИСТРОЄМ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

О.В. Колісниченко, Ю.М. Тюрін

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

Для нанесення покриттів із порошку WC–Co–Cr AMPERIT®554.074 використовувався багатокамерний детонаційний пристрій. Дослідження мікроструктури покриттів і фазового складу були проведені зі застосуванням методів растрової електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу. При напиленні даним методом формуються щільні покриття, що складаються з включень фаз карбіду вольфраму, рівномірно розподілених у Co–Cr матриці. Пористість покриттів складає ~0,2 %, мікротвердість – $10,4 \pm 1,2$ ГПа. Показано досвід застосування багатокамерного детонаційного пристрою для нанесення зносостійких покриттів з порошку WC–Co–Cr як на стадії відновлення деталей, так і при проектуванні вузлів різних механізмів. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: газотермічне напилювання, детонаційний пристрій, твердий сплав, покриття, мікроструктура, знос, пористість, твердість, промислове застосування

Вступ. Металокерамічні покриття, що напилюються газотермічними методами, є ефективним рішенням широкого спектра завдань щодо збільшення строку служби деталей машин і різних пристроїв [1, 2]. Покриття на основі карбіду вольфраму і карбіду хрому часто використовуються для підвищення зносостійкості в парах тертя, опору абразивному, корозійному й ерозійному зносу в насосно-компресорному і турбінному обладнанні, трубопроводній та запірній арматурі, в деталях целюлозно-паперової, текстильної, авіаційної галузей тощо. Крім того, напилювання твердосплавних покриттів вважається альтернативою гальванічному хромуванню через суворі екологічні норми й проблеми з витратами в технології процесу гальванічного нанесення покриттів [3]. Металокерамічні покриття наносять переважно високошвидкісним киснево-паливним методом (HVOF) і детонаційним напилюванням (DS) [4–6], унаслідок більш низької температури частинок порошку в потоці продуктів згоряння і меншого часу в польоті порівняно з плазмовими методами. Це дозволяє уникнути значного вмісту крихких фаз, а також зниження ступеня розкладу карбідів у процесі напилювання, запобігаючи водночас зменшенню твердості та зносостійкості. До того ж вищі швидкості частинок у високошвидкісних процесах забезпечують якісніше покриття з вищою когезією, адгезією, низькою пористістю. Наразі через вимоги до якості металокерамічних покриттів, що постійно зростають, ведуться роботи як зі створення нових, так і оптимізації існуючих технологій газотермічного напилювання. Окрім HVOF і DS, для нанесення металокераміки дедалі

частіше застосовуються такі технології, як холодне газодинамічне напилювання (CS) і метод високошвидкісного повітряно-паливного напилення (HVOF) [7, 8]. Розвивається також напрям і детонаційного нанесення металокерамічних покриттів [9]. Як один із багаточисельних варіантів конструкцій детонаційних пушок для газотермічного напилювання в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) було розроблено багатокамерний безклапанний детонаційний пристрій (БКДП). Метою даної роботи є дослідження мікроструктури і властивостей покриттів системи WC–Co–Cr, отриманих за допомогою БКДП, а також можливості його застосування для нанесення покриттів на виробі різних галузей промисловості.

Обладнання, матеріали та методики дослідження. Для нанесення покриттів на поверхню зразків зі сталі 12X18H10T використовували порошок WC–Co–Cr (86 %–10 %–4 %) (H.C. Stark) фракції 15...45 мкм (марка AMPERIT®554.074). Дослідження мікроструктури, елементного складу та морфології порошку (рис. 1, табл. 1) проводили на растровому електронному мікроскопі QUANTA 200 3D. За допомогою енергодисперсійного аналізатора рентгенівського випромінювання фірми EDAX, вбудованого в растровий електронний мікроскоп, були отримані спектри характеристичного рентгенівського випромінювання поверхні зразків порошку.

Покриття напилювали багатокамерним детонаційним пристроєм (БКДП) [10]. У цьому пристрої реалізується режим детонаційного горіння газової суміші в спеціально спрофільованих камерах. Схематично пристрій показано на рис. 2.

Колісниченко О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4507-9050>, Тюрін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7901-7395>

© О.В. Колісниченко, Ю.М. Тюрін, 2023

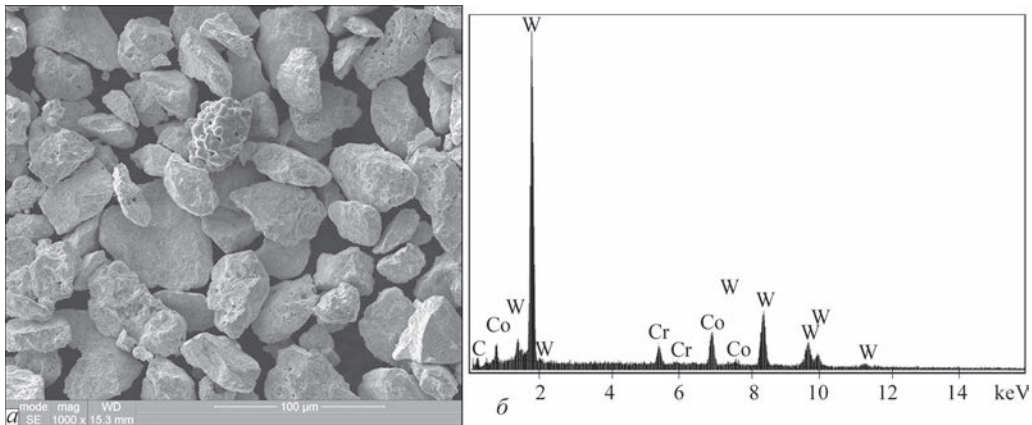


Рис. 1. Порошок AMPERIT®554.074: а – морфологія поверхні порошку WC–Co–Cr; б – спектр характеристичного рентгенівського випромінювання поверхні порошку

Таблиця 1. Елементний склад порошку WC–Co–Cr

Порошок	Елемент, Wt*/At**			
	C	Cr	Co	W
WC–Co–Cr	4,77/36,94	3,57/6,39	9,60/15,16	82,05/41,51

*Wt – мас. %; **At – ат. %.

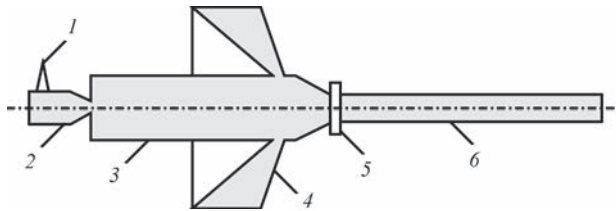


Рис. 2. Схема багатокамерного детонаційного пристрою: 1 – свічка запалювання; 2 – форкамера; 3 – циліндрична камера згорання; 4 – кільцева камера згорання; 5 – подання порошку; 6 – ствол

Акумуляція енергії згорання від двох камер (циліндричної та кільцевої) в стволі забезпечує формування високошвидкісного струменю продуктів згорання, який прискорює і нагріває порошок, що напилюється [11]. У пристрої реалізоване безперервне подання горючої газової суміші й порошку, що дозволяє ініціювати детонаційний процес згорання з великою частотою – 20 Гц і вище. На рис. 3 показано БКДП для напилювання покриттів, розміщений у звукоізоляційному боксі, оснащеному обладнанням для управління технологічним процесом. Обладнання складається з пристрою для напилювання, стандартного поро-



Рис. 3. Пристрій для нанесення покриттів з використанням БКДП

шкового живильника з поданням порошку до 3 кг/год, стандартної газової панелі низького тиску (макс. 0,3 МПа) для подання кисню, пропан-бутану, повітря й автоматизованої системи управління.

У процесі напилювання швидкість переміщення зразка, що напилюється, відносно ствола детонаційного пристрою становила 2000 мм хв, відстань до зразка – 50 мм, витрата порошку – 1,5 кг/год, витрата транспортуючого газу (азот) – 1 м³/год, частота детонації – 20 Гц. У табл. 2 наведені дані щодо витрати компонентів горючої газової суміші.

Структурно-фазовий аналіз зразків порошку й напиленого покриття з WC–Co–Cr проводили методом рентгенівської дифракції в області кутів 2θ від 20 до 100° із покроковим скануванням Δ(2θ) = 0,05° і часом експозиції 7 с у точці за допомогою дифрактометра ДРОН-УМ1 (у монохроматичному CuK_α-випромінюванні, λ = 0,154059 нм), що дає інтегральну інформацію про шар товщиною в кілька мікрон. У якості монохроматора використовувався монокристал графіту.

З метою дослідження порошкових покриттів на зразках були підготовлені поперечні шліфи. Мікροструктуру покриттів досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа Quanta 200 3D. Пористість визначали металографічним методом з елементами якісного і кількісного аналізу геометрії пор за допомогою оптичного інвертованого мікроскопа Olympus GX51. Об'ємну частку пор і

Таблиця 2. Витрати компонентів горючої суміші

Витрата компонентів горючої суміші, [м ³ /год]		
Кисень	Пропан (70 %) + бутан (30 %)	Повітря
2,7*/2,6**	0,66*/0,62**	1,7*/1,6**

*Циліндрична камера згорання. **Кільцева камера згорання.

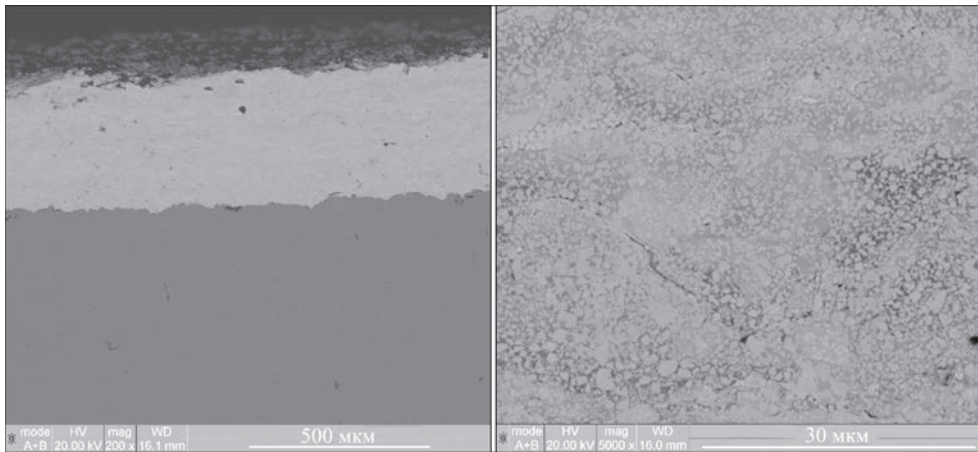


Рис. 4. Зображення (РЕМ) поперечного шліфа покриття WC-Co-Cr

структурних складових визначали за допомогою програми ATLAS у декількох полях зору. Мікротвердість визначають відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007 на мікротвердомірі М-400 фірми LECO методом тесту Віккерса при навантаженні на індентор 300 г.

Дослідження зносостійкості покриття WC-Co-Cr проводили методами трибометрії за допомогою автоматизованої машини тертя (Tribometer, CSM Instruments), що управляється комп'ютером, за стандартною схемою випробування «кулька-диск» за стандартом ASTM G-99. Зразок встановлювали в тримачі, перпендикулярно плоскості зразка закріплювали стержень, на кінці якого знаходилася кулька діаметром 6 мм з оксиду алюмінію. Випробування проводили на повітрі (температура навколишнього середовища 30 °С, вологість 23,8 %) при навантаженні 10 Н і лінійній швидкості 10 см/с, шлях тертя становив 1000 м.

Результати дослідження та обговорення. Зображення на скануючому електронному мікроскопі за різного збільшення мікроструктури поверхні поперечного шліфа зразка з покриттям WC-Co-Cr наведено на рис. 4.

Товщина нанесених покриттів на зразках, що досліджувалися, складала близько 370 ± 10 мкм.

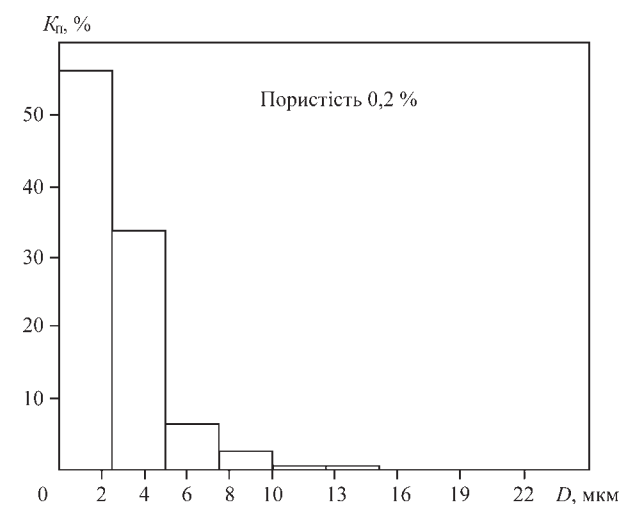


Рис. 5. Розподіл пор за розміром

На зображеннях поперечного перерізу не спостерігалося ні тріщин, ні ділянок розшарування.

Дослідження структури показали, що покриття складаються з рівномірно розподілених карбідних частинок діаметром від 0,5 до 2 мкм і прошарків Co-Cr матриці з товщиною до 1 мкм. На мікрознімках покриття карбідні частинки представлені у вигляді світлих ділянок з кутастими краями і, відповідно, не проплавлених під час напилювання; сіра зона відповідає матриці, яка багата Co і містить Cr, W та C. Чорні ділянки — пори. Гістограма розподілу пор за розміром у покритті показана на рис. 5. Пористість покриття WC-Co-Cr складає ~0,2 %.

Для детальнішої ідентифікації фаз як у вихідному порошку, так і в покритті проведено рентгеноструктурний аналіз. Рентгеноструктурним аналізом вихідних порошоків установлено, що у вихідному порошку WC-Co-Cr (марки AMPERIT®554.074, фракційного складу – 45 +15 мкм) WC — основна фаза (~ 80 %). Також виявлено до 12...14 % фази Co_3W_3C , присутність якої,

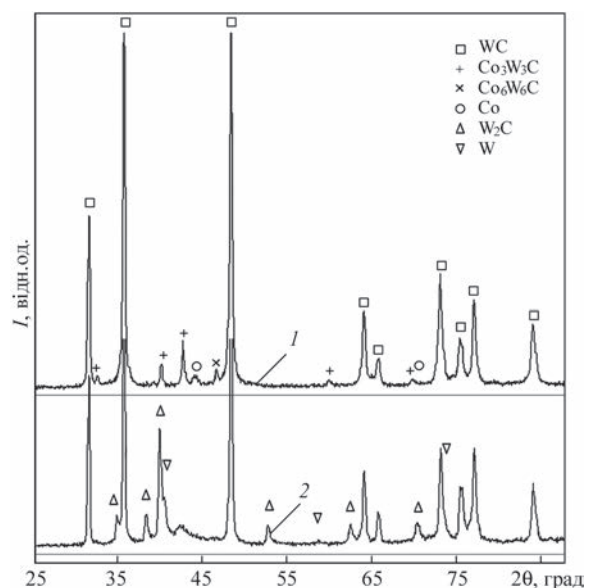


Рис. 6. Аналіз рентгенограми покриття: 1 – рентгенограма вихідного порошку WC-Co-Cr; 2 – рентгенограма покриття

очевидно, пов'язана з процесами, що відбуваються при виготовленні порошку (спікання насипного матеріалу й розмел спеченої губки). Інше – $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ і Co-Cr металева матриця (рис. 6, а). Аналіз рентгенограми покриття (рис. 6, б), нанесеного за допомогою БКДП, показав, що структуроутворення у даному випадку аналогічно процесам формування фаз, що мають місце при використанні інших методів високошвидкісного газотермічного напилювання [12]. Водночас з основною фазою WC (~60 %) в покритті з'являються нові фази W_2C (~18 %) і W (~6 %), наявність яких дозволяє зробити висновок, що відбуваються процеси розчинення й зневуглецювання зерен WC . Під час напилювання високотемпературні продукти детонаційного згорання нагрівають порошок. При цьому механізм зневуглецювання починається з плавлення металевої зв'язки Co-Cr , оскільки вона має більш низьку температуру плавлення, ніж карбіди WC . Після цього межі зерен WC починають розчинятися у розплавленому металі. В результаті вуглець реагує з киснем продуктів згорання. В момент удару об поверхню зразка частинки швидко холонуть. Із перенасиченого розчину навколо існуючих WC карбідних частинок у матриці формуються шари W_2C . Пік Co (як у порошок) не виявляється. Незважаючи на те, що твердість W_2C вища, ніж у WC , присутність більш крихкої фази W_2C , що оточує частинки WC , призводить до зниження зносостійкості [6]. Крім того, збагачення зв'язуючої фази Co-Cr вольфрамом і вуглецем збільшує її твердість і призводить до зниження міцності. На рентгенограмі між кутами $2\theta = 37...45^\circ$ присутнє гало, яке свідчить, що Co-Cr матриця може знаходитися в аморфно-нанокристалічному стані, що визначається високими швидкостями охолодження, властивими процесу напилювання із застосуванням БКДП.

Заміри мікротвердості проводили по всьому перерізу покриття. Отримана величина $HV_{0,3} = 10,4 \pm 1,2$ ГПа відповідає рівню твердості

покриттів, одержаних різними високошвидкісними методами напилювання [4].

Інтенсивність зносу зразка і контртіла (кулькі) внаслідок проведених випробувань на тертя (рис. 7) оцінювалась за формулою:

$$W = V/(P \cdot l),$$

де W – інтенсивність зносу ($\text{мм}^3 \cdot \text{н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$); V – об'єм видаленого матеріалу (мм^3); P – навантаження (н); l – шлях тертя (м).

Випробування показали, що коефіцієнт тертя в середньому складає $0,527 \pm 0,029$. Інтенсивність зносу покриття – $1,125 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3 \cdot \text{н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а контртіла – $4,603 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Приклади промислового застосування покриття. Високі фізико-механічні й експлуатаційні властивості покриттів з порошку WC-Co-Cr , що наносяться БКДП, були підтверджені на практиці. Наприклад, доцільно використовувати такі покриття для відновлення деталей запірної арматури: засувки, кульових кранів, клинових пробок тощо (рис. 8, а). Добре зарекомендували себе металокерамічні покриття при відновленні деталей целюлозно-паперової промисловості та поліграфії: скребки, ролики, тяглові й опорні плити, клапани та вали протяжки бумаги (рис. 8, б).

Застосування металокерамічних покриттів не обмежується тільки сферою відновлення деталей. Отримані покриття також дозволяють розробляти принципово нові технічні рішення деталей машин ще на етапі їх проектування. В якості прикладу на рис. 9 наведені деталі з легких сплавів зі зносостійким покриттям, напиленим БКДП. Покриття WC-Co-Cr на внутрішній поверхні корпусу з алюмінієвого сплаву роторно-поршневого двигуна дозволило значно збільшити його ресурс при зменшенні маси. В процесі проектування легкомоторних летальних апаратів виконання цієї умови є одним із найважливіших. Використання твердосплавного покриття на титанових деталях бурової телеметрії в геодезії дало змогу захистити їх від інтенсивного гідроабразивного зносу й тим

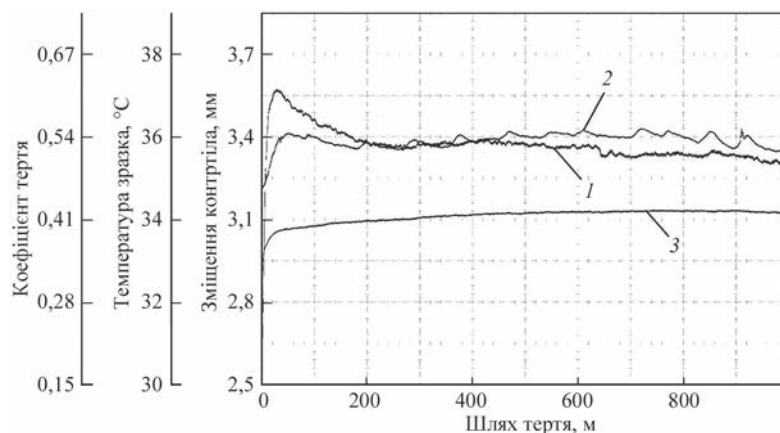


Рис. 7. Параметри тертя: 1 – коефіцієнт тертя; 2 – температура зразка; 3 – переміщення контртіла в напрямку, перпендикулярному поверхні зразка, що випробується

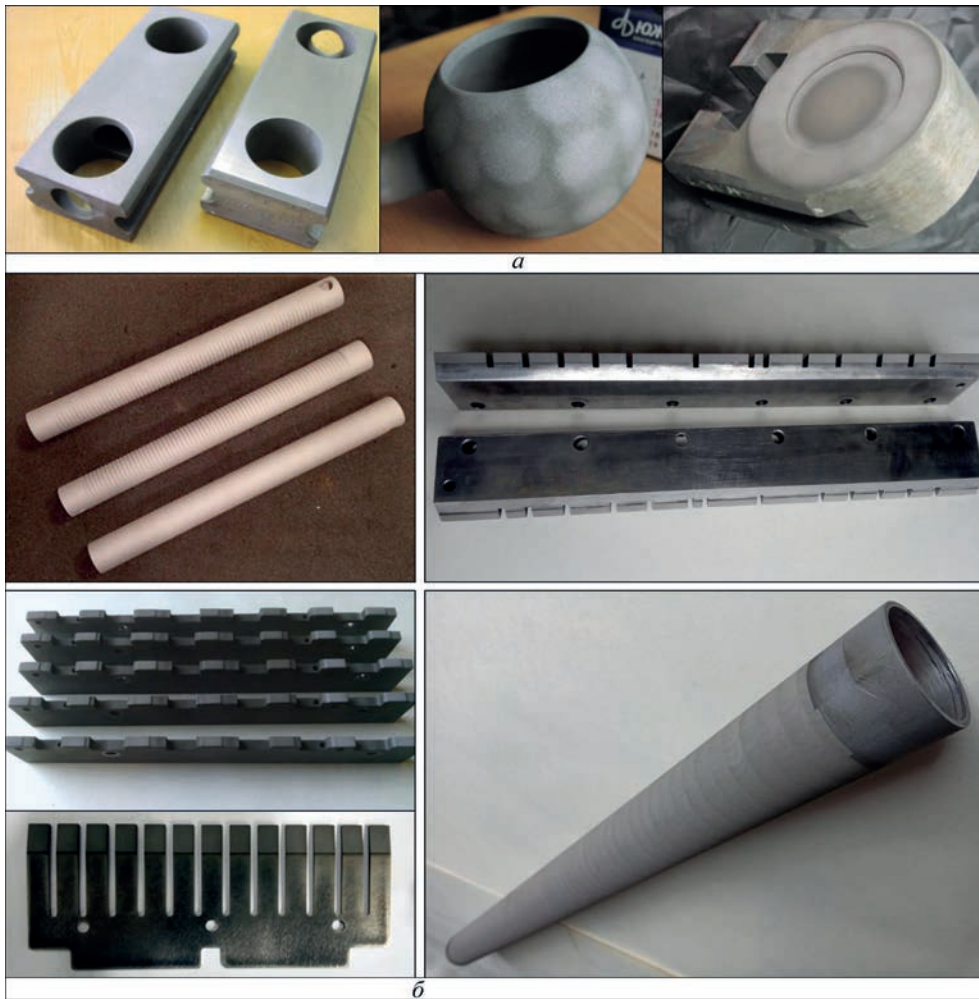


Рис. 8 Деталі з покриттям із порошку WC-Co-Cr: *а* – деталі запірної арматури; *б* – деталі целюлозно-паперової промисловості та поліграфії

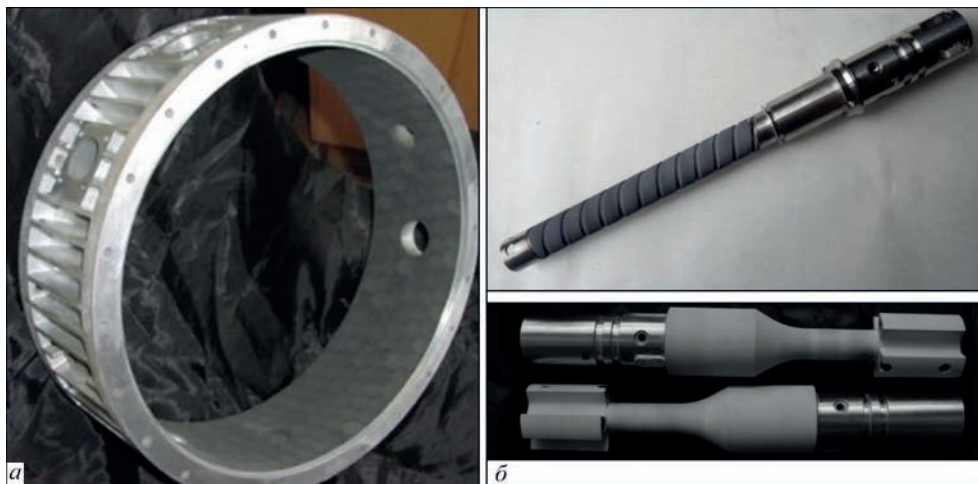


Рис. 9. Деталі з легких сплавів: *а* – корпус роторно-поршневого двигуна; *б* – деталі бурової телеметрії

самим збільшити час між доволі затратними ремонтно-налагоджувальними роботами.

Розглянуто декілька прикладів застосування покриттів з твердого сплаву. Коло ж завдань, які вирішуються, доволі велике і постійно розширюється. Вдосконалюються і методи детонаційного нанесення, розробляються нові зразки обладнання, що відкриває нові перспективи і сфери застосування технології.

Висновки

З використанням багатокамерного детонаційного пристрою реалізовано високошвидкісне газотермічне нанесення покриттів із порошку WC-Co-Cr.

Рентгеноспектральний аналіз показав, що формування покриття з використанням БКДП супроводжується процесами часткового зневуглецюву-

вання карбідів і утворення твердих, але крихких фаз. Що також характерно для інших HVOF і детонаційних методів нанесення покриттів, які широко застосовуються.

Твердість отриманих покриттів $HV_{0,3} = 10,4 \pm \pm 1,2$ ГПа і низька пористість $\sim 0,2\%$ дозволяють їх використовувати для запобігання абразивному, корозійному та ерозійному зносу поверхонь різних деталей машин та агрегатів.

Ефективність покриттів WC–Co–Cr, нанесених з використанням БКДП на деталі різних промислових пристроїв, підтверджена при їх практичному застосуванні.

Список літератури/References

1. Ang, A.S.M., Howse, H., Wade, S.A. et al. (2016) Development of processing windows for HVOF carbide-based coatings. *J. of Thermal Spray Technology*, 25, 28–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0318-z>
2. Berger, L.M. (2015) Application of hardmetals as thermal spray coatings. *Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials*, 49, 350–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2014.09.029>
3. Sun, B., Fukanuma, H., Ohno, N. (2013) Investigation and Characterization of HVOF WC–Co–Cr Coatings and Comparison to Galvanic Hard Chrome Coatings. *Proceedings of the Int. Thermal Spray Conference 2013, May 13–15, 2013, Busan, Republic of Korea*, 389–394.
4. Борисов Б.С., Астахов Е.А., Мурашов А.П. и др. (2015) Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC–Co–Cr, полученных высокоскоростными методами напыления. *Автомат. сварка*, 10, 26–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.04>
Borisov, Yu.S., Astakhov, E.A., Murashov, A.P. et al. (2015) Investigation of structure and properties of thermal coatings of WC–Co–Cr system produced by high-velocity methods of spraying. *The Paton Welding J.*, 10, 25–28 DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.04>
5. Singh, L., Chawla, V., Grewal, J.S. (2012) A review on detonation gun sprayed coatings. *J. of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11(03), 243. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2012.113019>
6. Picas, J.A., Punset, M., Baile, M.T. et al. (2009) Properties of WC–Co–Cr Based Coatings Deposited by Different HVOF Thermal Spray Processes. *Plasma Processes and Polymers*, 6, 948–953. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.200932402>
7. Torkashvand, K., Gupta, M., Björklund, S. et al. (2021) Influence of nozzle configuration and particle size on characteristics and sliding wear behavior of HVOF-sprayed WC–Co–Cr coatings. *Surface and Coatings Technology*, 423, 127585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127585>
8. Granata, M., Gautier di Confingo, G., Bellucci, F. (2022) High-Pressure Cold Spray Coatings for Aircraft Brakes Application. *Metals*, 12(10), 1558. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12101558>
9. Bamola, R., Ewell, T., Robinson, P. et al. (2016) Coatings Deposited Using a Valve-Less Detonation System. *Proceedings of the Int. Thermal Spray Conference 2016, May 10–12, 2016, Shanghai, P.R. China*, 127–131. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2016p0127>
10. Тюрін Ю.М., Колісниченко О.В. (2008) Спосіб детонаційного напылення покриття і прилад для його здійснення. Україна Пат. 83831.
Tyurin, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. (2008) *Method of detonation spraying of coatings and device for its realization*. Pat. 8383, Ukraine.
11. Колісниченко О.В., Тюрін Ю.Н., Товбін Р. (2017) Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства. *Автомат. сварка*, 10, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.10.03>
12. Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.N., Tovbin, R. (2017) Efficiency of process of coating spraying using multichamber detonation unit. *The Paton Welding J.*, 10, 18–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.10.03>
12. Garfias Bulnes, A., Albaladejo Fuentes, V., Garcia Cano, I. et al. (2020) Understanding the influence of high velocity thermal spray techniques on the properties of different anti-wear WC-based coatings. *Coatings*, 10 (12), 1157. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10121157>

PROPERTIES OF COATINGS, DEPOSITED BY MULTICHAMBER DETONATION DEVICE AND THEIR APPLICATION

O.V. Kolisnichenko, Yu.M. Tyurin

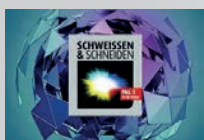
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: okolis@i.ua

Coatings from WC–Co–Cr AMPERIT®554.074 powder were deposited using a multichamber detonation device. Investigations of coating microstructure and phase composition were conducted, using scanning electron microscopy and X-ray structural analysis. Dense coatings form at spraying by this method which consist of inclusions of tungsten carbide phases, uniformly distributed in Co–Cr matrix. Coating porosity is equal to $\sim 0.2\%$, microhardness is 10.4 ± 1.2 GPa. Experience of application of multichamber detonation device for deposition of wear-resistant coatings from WC–Co–Cr powder is shown, both at the stage of part reconditioning and at design of components of various mechanisms. 12 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: thermal spraying, detonation device, hard alloy, coating, microstructure, wear, porosity, hardness, industrial application

Надійшла до редакції 18.07.2023



«SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» – 2023

Найважливіша зварювальна виставка в світі «SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» відбулася в період з 11 по 15 вересня 2023 р. в конференц-центрі Messe

Essen. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона прийняв участь в роботі виставки на стенді 8B29.1. Звіт фахівців ІЕЗ за результатами роботи виставки буде надруковано в журналі «Автоматичне зварювання» №11, 2023.



THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING: 75 YEARS

J. C. Lippold, S. Egerland, R. Shaw, E. Raufelder

Emeritus Faculty, Department of Materials Science and Engineering, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.

E-mail: erdmuthe@iivwelding.net

This year, the **International Institute of Welding (IIW)** celebrates its 75th anniversary as the leading international professional organization devoted to the advancement of welding, joining, and allied technologies. This year also marks the 60th anniversary of *Welding in the World* which was established by IIW in 1963 as a mechanism to publish authoritative papers and other articles that represent the work of the technical commissions within IIW. This article provides a brief history of IIW and its relationship to *Welding in the World*.

1 A brief history of the international institute of welding

The following provides a brief history of the International Institute of Welding. For an in depth account, *Joining Nations* by P.D. Boyd is recommended [1]. The book by David Barnett entitled *Linking people, Joining nations* reviews IIW history from 1990 to 2017 [2].

IIW was officially founded in 1948 during a meeting of international welding societies in Brussels, Belgium. The 13 founding countries were Austria, Belgium, Denmark, France, Italy, the Netherlands, Norway, South Africa, Spain, Sweden, Switzerland, the United Kingdom, and the United States. These countries were represented by 21 technical organizations including Institut de Soudure (France), Istituto Italiano della Saldatura (Italy), the Welding Institute (United Kingdom), and the American Welding Society (USA).

An original organizing principle was the establishment of “commissions” to coordinate and conduct the work of IIW. Initially, five commissions were identified dealing with gas welding, electric arc welding, resistance welding, documentation, and education. By the first member assembly held in Delft, the Netherlands, in 1949, a total of 12 commissions had been established and held their first meetings. A list of these commissions and the inaugural chair for each

is provided in Table 1. Commissions XIII (fatigue testing), XIV (welding instruction), and XV (fundamentals of design and fabrication for welding) were subsequently established by 1951. Commission XVI (welding of plastics) was established in 1962.

Over the ensuing years, some commissions were merged and new ones established. For example, C-IV, Documentation was merged with C-VII and replaced by High Energy Density Welding in 1985. A complete history of the evolution of the commission structure can be found in the reference texts [1, 2].

The concept of an “Annual Assembly” began in 1950 in Paris with meetings of the commissions separated into Groups A and B to accommodate attendees participating in multiple commissions. Because IIW membership was primarily European, early assemblies were held in London (1951), Göteborg (1952), Copenhagen (1953), Florence (1954), Zurich (1955), Madrid (1956), Essen (1957), and Vienna (1958). The first annual assembly outside of Europe took place in 1961 in New York City.

2 *Welding in the World* and its relationship to IIW

To quote directly from P.D. Boyd...“one of the most vexed problems which the IIW has had to confront throughout the whole course of its existence is that of making its work known” [1]. In 1956, IIW

Table 1 Initial technical commissions established by IIW in 1949

Commission	Topic	Chair
I	Gas welding and allied processes	C.G. Keel (Switzerland)
II	Arc welding	H.E. Jaeger (Netherlands)
III	Resistance welding	US delegation
IV	Documentation	A. Leroy (France)
V	Testing, measurement and control of welds	P. Goldschmidt (Belgium)
VI	Terminology	F.M. van Horenbeeck (Belgium)
VII	Standardization	A. Leroy (France)
VIII	Health and safety	S. Forsman (Sweden)
IX	Weldability	H.G. Geerlings (Netherlands)
X	Residual stresses	R. Weck (United Kingdom)
XI	Stress relieving	W. Soete (Belgium)
XII	Brittle fractures	F. Jonassen (USA)

established a Publications Committee which was tasked to address this problem. The idea of publishing an IIW journal was initially rejected partly because it was felt a bilingual (French/English) journal was not practical and too expensive to produce. Instead, a *Bibliographical Bulletin* was adopted to publish abstracts of documents presented at the Annual Assembly. In 1963, a quarterly bilingual journal was launched as *Welding in the World*.

That year there were 4 issues published with 17 total papers. The first editor (1963–1966) was Guy Parsloe. In 1968, the number of issues was increased to 6 per year, a publication rate that remained until 2020 when publication increased to 12 issues per year. From 1968 to 1991, Philip Boyd served as Editor and was followed by John Hicks (1991–1995). From 1996 through 2009, the CEO of IIW served as the Editor of *WitW* and included Michel Bramat, Daniel Beaufile, André Charbonnier, and Cécile Mayer. In 2009, a decision was made to appoint editors external to the Secretariat and Bruno de Meester (Belgium), Thomas Böllinghaus (Germany), and John Lippold (USA) were named as co-editors.

The original publication coordinator at the secretariat was André Leroy (1963–1974). He was succeeded in 1975 by Henry Granjon, who held this post until 1986, followed by Michel Bramat (1986–2000), Nöelle Fauriol (2001–2004), Véronique Souville (2004–2012), Pierre Tran (2012–2016), and Nadège Brun (2016–2020). In 2020, the Secretariat headquarters were relocated from the Institut de Soudure to the Istituto Italiano della Saldatura in Genoa, Italy. As part of this move, Erdmuthe Raufelder (2020–present) was appointed as the Managing Editor of the journal.

For its first 20 years (1963–1983), *WitW* was published by IIW, then by Pergamon Press until 2001. From 2001 through 2012, it was again published by IIW. As described below, *WitW* has now joined the Springer group of journals and, starting in 2013, was available in both online and print versions. For the first 30 years, the journal was published in both English and French (*Le Soudage dans Le Monde*) with the transition to English-only occurring in 1994. With all these changes, *WitW* has taken on many different looks over the years as demonstrated by the journal covers shown in Fig. 1.

Welding in the World was originally established as a vehicle for publishing the work of commissions within IIW (see section below). Selected papers presented at the Annual Assembly were recommended by the commissions for publication. These papers were then edited (and translated) by the Secretariat for inclusion in the journal. Editing and translation limited the number of papers that could be published, as seen in Fig. 2. An average of about 20 papers per

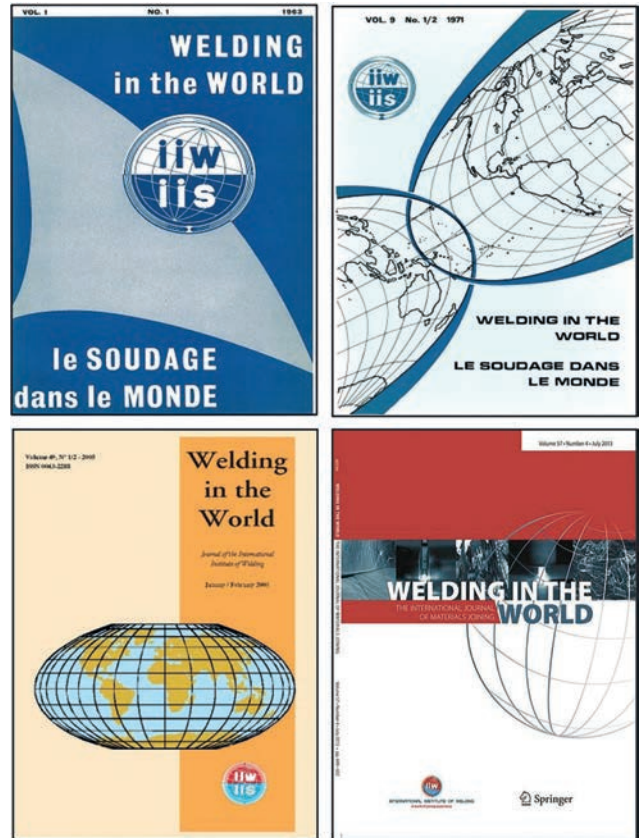


Fig. 1 The changing covers of *Welding in the World*

year were published from 1963 to 1993. The transition to English-only in 1993 resulted in a marked increase in papers published, although the number of papers per year was highly variable.

As noted previously, in an effort to promote *Welding in the World* as a leading international journal, editors from outside IIW were appointed in 2009. Bruno de Meester (Belgium) was the first, followed by Thomas Böllinghaus (Germany) and John Lippold (USA). Their first task was to streamline the peer review system, which they had already introduced in 2008, and to improve the quality of papers published. In 2009, an application was filed to join the Science Citation Index (SCI). The SCI, originally monitored by Thompson-Reuters, provides an indicator of the quality and impact of the journal. Entry into the SCI was approved in 2010.

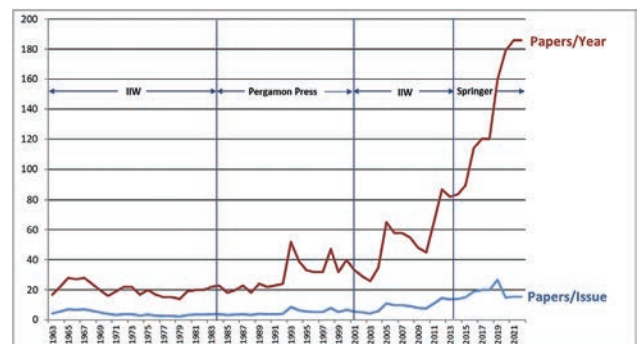


Fig. 2 Publication rate of *Welding in the World*

Another significant milestone in the evolution of *Welding in the World* occurred in 2013 with the agreement with Springer to become the journal publisher. An online peer review system (Editorial Manager™) was introduced to streamline the review and approval of papers recommended by the commissions. Papers approved for publication are assigned a DOI and are published immediately through Online First™. This allows papers to be made available online up to 3 months before they appear in print. The relationship with Springer has allowed more papers to be published, since the manuscript throughput is no longer limited by the editorial constraints of the Secretariat.

Over the past 10 years the rate of publication in *Welding in the World* has increased dramatically, as shown in Fig. 2. In 2022, over 180 papers and 2500 pages of fundamental and applied research were published. It is currently projected that over 200 papers and nearly 3000 pages will be published in 2023, the 60th anniversary of the journal.

Metrics that measure the visibility and impact of the journal have also improved dramatically, as shown by the chart in Fig. 3 which tracks the journal impact factor and CiteScore over the last 10 years. Other metrics including number of papers recommended by commissions, total cites of WitW papers, and full text downloads are shown in Table 2.

Prior to 2014, virtually all the papers published in *Welding in the World* were recommended by the commissions, either at the annual assemblies or intermediate meetings. In 2014, the journal made “open submission” possible allowing authors not associat-

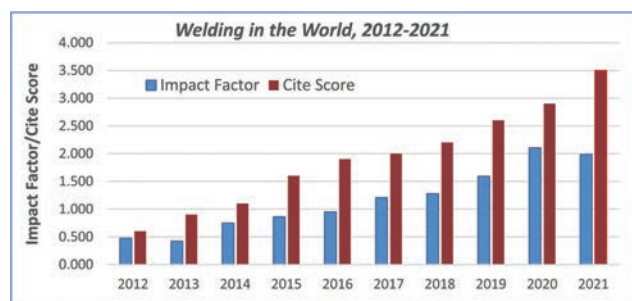


Fig. 3 Impact factor and CiteScore for welding in the world, 2012–2021

Table 2 Journal metrics, 2015–2022

Metrics	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Recommended papers from IIW commissions	115	130	126	135	156	82	93	144
Total decisions	172	358	290	443	477	580	455	510
Papers published	90	114	120	120	160	179	186	186
Pages published	930	1300	1300	1350	1900	2170	2440	2670
Total cites	327	521	807	829	939	1,556	2,319	>2,500
CiteScore	1.6	1.9	2.0	2.2	2.6	2.9	3.5	~3.8
Downloads	43,250	59,093	73,820	83,651	111,022	154,897	216,101	250,541
SCI impact factor	0.861	0.948	1.206	1.278	1.589	2.103	1.984	~2.2

ed with IIW to submit their work to the journal. As shown in Table 2, this resulted in a dramatic increase in the number of papers decided annually and put considerable stress on the peer review system. The Editors quickly developed a “prescreening” procedure for these papers and significantly expanded the Editorial Board and panel of reviewers to accommodate this increased workload. The journal now receives about 500 papers a year with nearly 75% of these papers coming through open submission.

The IIW commissions are still the most important contributors to the journal with over 50% of the papers published in a given year coming from those recommended by the commissions. The review and selection processes used by the commissions ensure that only the best papers are recommended for publication in the journal. Rejection rates for these recommended papers are typically less than

20% in contrast to the high rejection rate of open submission papers. Based on the importance of the commissions to the success of *Welding in the World* by recommending highquality papers, containing relevant research and industrial applications, the following section reviews the technical mission of each commission and its “2.2” over the next 10 years.

2.1 The IIW commission structure

As described previously, the technical activities of IIW are coordinated through what is known as a “commission structure.” The commissions were established and modified over the years to address important technical issues within the IIW community. The earliest of the commissions, established in the first few years of IIW’s existence focused on welding processes, thermal cutting, filler metals, weldability, non-destructive evaluation, fracture behavior, education, and health and safety (see Table 1). As the mission of IIW expanded, commissions were added to address structural integrity, polymer joining, brazing and soldering, and micro-joining processes. Cross-cutting commissions were also established to evaluate the application of welding technology to various structural applications. The complete history of the evolution of the IIW commission structure is described in more detail elsewhere [1, 2]. The following

sections provide descriptions of commissions that are currently active within IIW and which contribute to the science and technology published in *Welding in the World*. A summary of papers published in *Welding in the World* from 2017 to 2022, organized by commission, is provided in Fig. 4.

2.2 Commission I: additive manufacturing, surfacing, and thermal cutting

C-I focusses on thermal processes including additive manufacturing, surfacing, thermal cutting, and allied processes, especially with respect to a better scientific understanding and the practical applications of these processes. Scientific and technical contributions by C-I members give attention to process modelling, mechanical properties of the end-products, production planning, and quality assurance, by both on-line and off-line processing. In addition, improvements in additive manufacturing, surfacing, and thermal cutting equipment are continuously being reviewed and monitored. Recently, a major emphasis has been on additive manufacturing and laser cutting, especially in relation to the newest technology advances. Additive manufacturing covers a very broad set of processes and material types and is rapidly becoming an industrialized process in need of documented research and property development. The work on additive manufacturing will be made in a very close cooperation with other working units interested in the subject (Fig. 5).

2.2.1 Outlook

Additive manufacturing continues to grow in terms of technology and potential applications. This commission will continue to interact closely with process-specific commissions including C-IV, HED Processes, and C-XII, Arc Welding Processes to expand the knowledge-base and application of additive manufacturing processes to industrial applications. The rapid rise in the importance of arc-based AM technology has expanded the range of potential applications to multiple technology sectors. Although the efforts on AM have been led in large part by these commis-

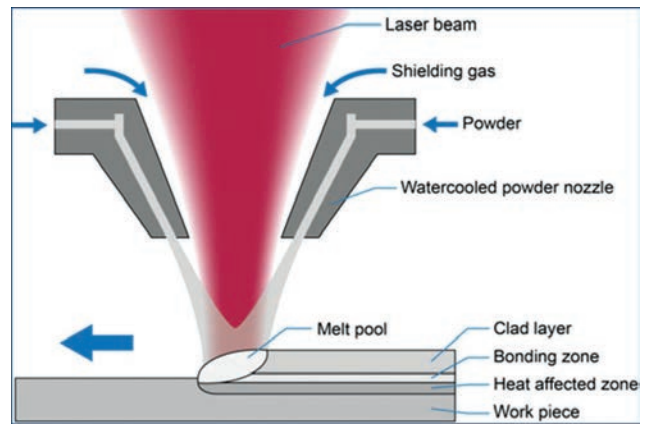


Fig. 5 Additive manufacturing using the laser powder feed process (3)

sions, all commissions within the IIW have areas where AM has been growing as a research and manufacturing activity. Worldwide, there have been a significant number of technical conferences devoted to the development and use of AM.

As an indicator of the important work of this commission relative to additive manufacturing, three Topical Collections have been published in *Welding in the World*, namely, 1) *Welding, Additive Manufacturing and Associated NDT* (2018), 2) *Additive Manufacturing—Processes, Simulation and Inspection* (2020), and 3) *Additive Manufacturing Processes and Performance* (2023).

These collections, each containing 15–25 papers, provide a valuable resource regarding the current state-of-the-art regarding AM processes and applications.

In the other areas covered by C-I, including surfacing technology and thermal cutting, there are very active subcommissions that have reinvigorated the studies and reporting in these areas. Over the last few years, several technical papers and new manufacturing innovations have been reported in these important areas.

2.3 Commission II: arc welding and filler metals

Commission II was established nearly 75 years ago in 1948 under the first Chairmanship of Professor H. E. Jaeger (Netherlands), where the terms of reference were to cover the applications of arc welding in all its forms. Today, Commission II is mainly concerned with arc welding and the filler metals that are used with those processes.

The commission identifies, develops, and transfers scientific and technical information, in some cases leading to International Standards or best practices, with respect to Arc Welding and Filler Metals. Its principal areas of focus include the metallurgy of weld metal (e.g., hydrogen in weld metal, chemical reactions, constitution of weld metal, and weld metal

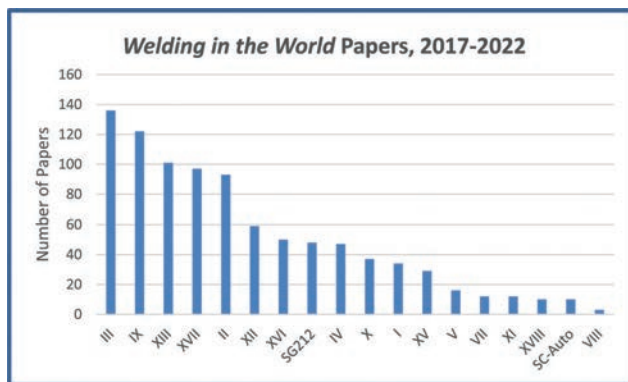


Fig. 4 Papers, organized by commission, published in *Welding in the World* from 2017 to 2022. Note that SG212, Physics of Welding and SC-Auto have now been merged with other commissions

cracking), and the testing and measurement of welds (e.g., ferrite in high-alloyed weld metal, corrosion testing and testing of weld metal for hot cracking and micro-fissuring). The commission is also involved in standardization of welding consumables, including the coordination of the evaluation of ISO standards which are under systematic review, assuming responsibility for appropriate testing standards and conducting round-robin tests as may be required in support of the general work program. These activities have greatly contributed to the understanding, acceptance, classification, and adequate use of arc welding processes and filler metals.

In the early days of the commission much of its activity was focused on hydrogen-assisted cracking and the development of materials and procedures to avoid this form of cracking. Many of the now widely used procedures for avoiding HAC were developed through the efforts of C-II. Many of the commission activities involve the metallurgy of weld metals, the influence of the chemical composition including major alloying elements and minor trace elements on the mechanical, corrosion, and weldability properties, and ultimately on the reliability of welds in practical services.

Over the years, the commission work has involved various issues of filler metal optimization and development with respect to metallurgy, new material grades, new arc welding processes, and practical applications. There is a thematic overlap with other IIW commissions in some general technical topics of interests, particularly with Commission IX regarding metallurgical issues and weldability. Because of the strong emphasis on filler metals, there is also an emphasis on health and safety particularly with respect to welding fume, where it cooperates with Commission VIII.

Due to the common interest and goals for welding filler metals, a unique and close partnership has grown among IIW C-II, ISO/TC 44/SC 3 and CEN/TC 121/WG 3, where C-II has been involved in development of Testing Standards as well as Filler Metal Standards. IIW pioneered the measurement of diffusible hydrogen in welds. ISO 3690, for instance, is a direct product of the collaboration of experts within C-II and ISO/TC 44/SC 3. Another example is ISO 8249 standard for the determination of Ferrite Number (FN) and the latest ISO Technical Report, ISO 22824 (DTR stage), for the best practices for specification and measurement of ferrite in stainless steel weld metal which were prepared in collaboration with ISO.

Since the founding of the journal 60 years ago, Commission II has been one of the leading contributors to *Welding in the World* and has recommended a large number of high quality research and engineering papers published in the journal. Many of its mem-

bers serve on the WitW Editorial Board and serve on its peer review panel.

2.3.1 Outlook

As new, advanced structural materials are developed to meet existing or future applications, joining technology and filler metal development continue to be a critical part of this development. It is well documented that many highperformance materials are often developed without the consideration of techniques used to join them. The development of new filler metals that are compatible with these advanced materials and allow application in a wide range of engineering designs will be a continuing challenge (Fig. 6).

2.4 Commission III: resistance welding, solid-state welding, and allied joining processes

Commission III provides a unique platform for more than 300 international experts to exchange scientific and technical knowledge on resistance welding, solid state welding and allied joining processes. In the 1990s, a large amount of work in C-III was invested on the development of standards for resistance spot welding. As a result, a substantial number of ISO standards were issued, providing the industry, especially the automotive sector, with much needed guidance on process control and monitoring, testing and analysis, and quality aspects. By the end of the 1990s, the introduction and application of Friction Stir Welding (FSW) technology revolutionized the world of solid-state joining processes. The unique thermomechanical conditions imposed by this process on the base materials fascinated and intrigued researchers around the world. Furthermore, the possibilities offered by FSW were also noted by a range

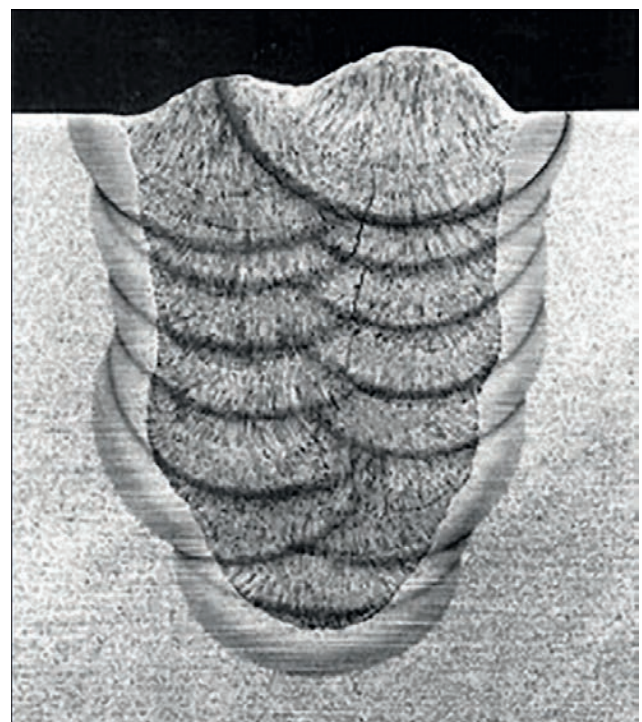


Fig. 6 Multipass weld in steel

of industries, which actively supported research to study the mechanisms of joint formation and the understanding of microstructural evolution and the resulting properties. As a result, FSW became a main topic for scientific and technical contributions to Commission III and for manuscripts published in *Welding in the World*.

The available body of work on FSW encouraged the formation of a standardization group which produced in 2011 the first dedicated ISO standard (ISO 25239:2011-Friction stir welding—Aluminium, Part 1–Part 5). This standard, which was reviewed in 2020, provides much needed support for FSW-based industrial fabrication and is extensively used by small and medium enterprises worldwide. Since the introduction of the FSW technology, a number of process variants were developed and introduced in the market expanding the interest of the industrial and scientific communities on solidstate processing of materials.

Resistance welding in general, and resistance spot welding in particular, faced an increasing demand for solutions addressing the use of Al and Al-based dissimilar joints in body-in-white production. This demand was met by a number of creative solutions both in process control and hardware side of the process. With the introduction of advanced high strength steels (AHSS), the focus of the resistance spot welding community started to turn to issues of liquid metal embrittlement (LME). As a result, in the last years, C-III has developed an impressive portfolio of documents on the understanding and mitigation of LME (Fig. 7).

2.4.1 Outlook

The work in Commission III will focus on addressing societal needs related to de-carbonization and the optimized use of resources, especially materials. Additionally, the supply chain problems experienced in the last years will also receive attention from C-III members. These changes are reflected by the creation of a new sub-commission dedicated to solidstate additive manufacturing and a recur-

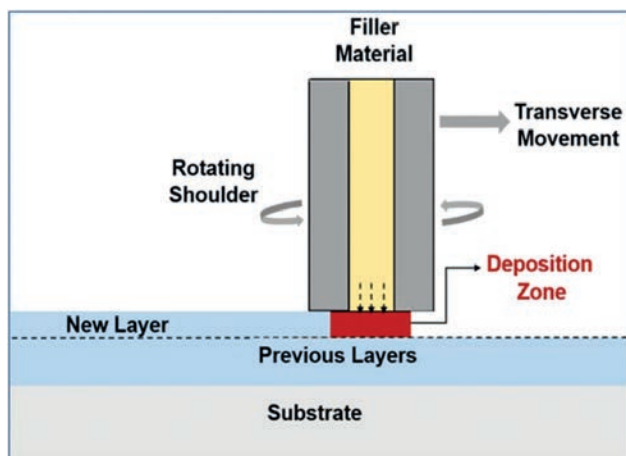


Fig. 7 FSW additive manufacturing (4)

ring symposium on the application of resistance and solid-state welding in the fabrication of electric vehicles. Furthermore, the use of data management, machine learning, and artificial intelligence in resistance and solid-state welding is becoming frequent topics in the current work plan and will continue into the future, forming the basis of a new sub-commission. The extensive amount of available data on resistance spot welding will lead to pioneering work in these fields.

2.5 Commission IV: power beam processes

Commission IV operates for scientists, engineers, and technical personnel who are involved in the research, development, and application of power beam processing technologies including laser, laser-arc hybrid, and electron beam welding processes. These processes are in a continuous state of development and advancement as new technologies and innovations offer a nearly unlimited array of welding, joining, and processing opportunities. Technical and scientific presentations by Commission members focus on new processes, process modeling, mechanical properties of end products, and environmental health and safety. C-IV is especially active in the study of the application of power beam processes to novel and otherwise difficult to weld materials including high-strength steels, stainless steels, light alloys, dissimilar materials, and coated products. In conjunction with C-I and C-XII, the Commission works to establish more reliable welding and joining technologies with higher productivity through an improved understanding of the physical phenomena governing beam processes. In particular, this joint group of commissions has been active in the laserbased additive manufacturing processes (Fig. 8).

The key objectives and working program of C-IV include the following topics:

- Fundamental technological knowledge of power beam processes with respect to the weldability of structural metals.
- Relevant EN ISO standards, which are applicable for power beam processes.
- Definition of process parameters according to industrial demands using laser, electron, and laser-arc hybrid welding.

2.5.1 Outlook

C-V will continue to be the focal point of basic research and applications of power beam processes within IIW. It will also continue to collaborate through joint meeting and workshops with Commissions I and XII. Specific goals of C-IV include a) providing the right knowledge and skills to existing and future welding professionals and b) eliminating international barriers to establish uniform regulations for products, services, and individuals.

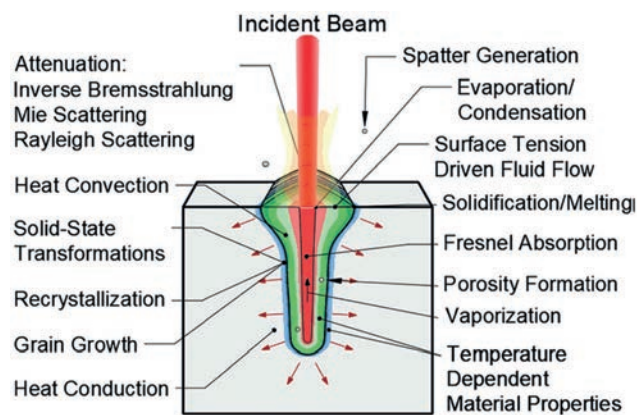


Fig. 8 Schematic showing beam-material interactions during keyhole LBW (5)

2.6 Commission V: NDT and quality of welded products

Commission V has the challenging task of monitoring, reviewing and contributing to all international standardization activities related to non-destructive testing (NDT) and evaluation of welded structures. The Commission has specialist groups concentrated on the following fields:

- CV-A, radiographic-based weld inspection
- CV-C, ultrasonic-based weld inspection
- CV-D, structural health monitoring
- CV-E, weld inspection based on electric, magnetic, and optical techniques
- CV-F, NDT reliability including simulation of NDT techniques

Non-destructive testing is a cross-sectional discipline that has its interfaces with component design, construction and fracture mechanics. A component's design must ensure both that it functions properly and that it can allow subsequent nondestructive testing. Once material damage is detected, and its size, location, and orientation determined, fracture mechanics will determine whether the component can still remain in operation. Particularly when it comes to joined components, attention must be paid to any alterations in mechanical material parameters in the weld and the adjacent heat-affected zone. Imaging techniques also have the ability to detect defect dynamics of damage that grows during operation. The objective of nondestructive testing is therefore to convert the test data as realistically as possible into a statement about the existing material defects and the resulting mechanical condition of a component. This is especially difficult in cases involving complex materials with high anisotropy or heterogeneous morphology like in composites or austenitic steels. Taking the tremendous progress in NDT-techniques into account, the working group on ultrasonic-based weld inspection (CV-C) is currently preparing a new edition of the austenitic *Ultrasonic Handbook*.

Generally, the interpretation of a test result related to a component's true condition is based on solving

the inverse problem. In three dimensions, the greatest strides have been made by computer tomography which offers a comprehensive 3D solution using digital detectors. Sub-commission CV-A has helped to shape the change from film-based radiography to digital flat-panel detectors by making important contributions to standardization.

Many alternative scanning inspection methods come up short on data because only one viewing direction is scanned two-dimensionally. That makes 3D reconstruction extremely difficult. In the last decade, however, non-destructive testing has seen a clear trend towards 3D imaging inspection. In the field of ultrasonics, methods such as TFM (total focusing method) have been developed as a 3D-reconstruction tool, and strategies on how to apply them have also been improved. This knowledge has been transferred into an ISO standard (ISO 23864) by the experts of Commission V. C-V also deals with the adjacent field of SHM (structural health monitoring), where permanently mounted test equipment monitors the condition of a component. CV-D and recently initiated the revision of ISO 18211, Guided Wave Testing.

To improve the solution of inverse problems, all aspects of NDT must be taken into consideration, including wave generation, wave defect interaction, wave detection, signal processing, and imaging algorithm. Predicting this complex interaction has been made possible through advanced modeling and simulation tools that have paved the way for access to materially complex testing situations. Sub-commission CV-F has initiated new simulation approaches to support practical applications and to prove the feasibility of new testing methods. In addition to ultrasound, for example, active thermography is rapidly on its way to becoming a viable near-surface 3D method thanks to creative, new reconstruction approaches such as virtual wave concepts, AI-reconstruction or new flexible excitation strategies to compensate lateral heat flow. Eddy current inspection is another surface method that is following the trend towards the use of higher data density. Here, the use of eddy current arrays lead to shorter inspection times. Commission CV-E has taken up this development and is currently pushing ahead with a new standard on Eddy current arrays. In the field of magnetic methods, a revision of the standard of the Metal Magnetic Memory Method (ISO 24497) has been finalized (Fig. 9).

2.6.1 Outlook

As in many other fields of technology, non-destructive testing is currently undergoing a transformation towards a higher degree of automation. This includes both the field of robotics and automated approaches to analyze raw data and evaluate test results. Both the omnipresent cost pressure in quality assurance and the shortage of qualified inspectors in many

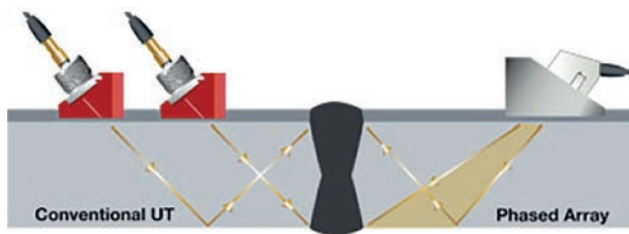


Fig. 9 Conventional versus phased array ultrasonic testing (courtesy Olympus)

sectors are driving the trend towards machine-based inspections. It is obvious that the current rapid progress in the field of artificial intelligence (AI) will massively accelerate this change. Already, numerous examples demonstrate the enormous power of AI-based algorithms in the field of 3D reconstruction. There is no question that AI will find its place as a mathematical tool here. However, numerous standards will have to emerge to address how to deal with AI as a “decision maker” and how much responsibility can be handed over to synthetic examiners. Finally, there will also be a legal and social issues associated with AI. To address this important question, the IIW tradition of multi-disciplinary joint sessions with other IIW Commissions will be key to finding optimized solutions.

2.7 Commission VI: terminology

Commission VI is responsible for the development, collection, and maintenance of welding terminology using appropriate tools and software capable of handling multiple languages. This terminology is obtained from the comparison and evaluation of existing international, regional, and national standards in order to avoid duplication and ensure global relevance. The terminology is made available in print and electronic media, especially through a close collaboration with ISO, the International Organization for Standardization. Thus, the technical output of Commission VI is represented by the publication of the ISO 25901 series of standards, rather than through the publication of articles in journals such as *Welding in the World*. In this regard, Commission VI quite atypical as compared with the other IIW commissions.

Its areas of interest cover a wide range of disciplines and technologies, including, but not limited to, welding and joining processes, joint design, performance and testing, metallic and non-metallic materials, and many additional aspects of materials joining such as personnel and quality management, welding equipment, and consumables. In order to ensure technical reliability and accuracy on specific topics, Commission VI is committed to enlist, whenever possible, competent experts from other IIW commissions or organizations.

Further, Commission VI closely focuses on the multiple interdependencies between all the terms

and definitions it manages, to ensure a comprehensive, coherent, and organized vocabularies relevant for the whole materials joining community (including individuals involved at the academic, research, and/or industrial levels). To do so, it notably relies on its sub-commission VI-A, which maintains and develops the IIW Thesaurus. The Thesaurus is used by information specialists who are constructing bibliographic databases in order to index scientific and technical literature in the field of welding and allied processes.

2.7.1 Outlook

The current focus of the commission is on laser welding, with an existing work item in ISO’s work program (ISO/ AWI 25901-5 “*Welding and allied processes–Vocabulary–Part 5: Laser welding*”). Other subjects under development include plastics thermal joining (draft developed under collaboration with ISO/TC 61 (:*Plastics*”), and thermal cutting. Other projects are being developed in conjunction with ISO/TC 44/SC 7 (“*Welding and Allied Processes–Representation and Terms*”) for the revision of ISO/TR 25901-1 (“*General Terms*”) and of ISO/TR

25901-4 (“*Arc Welding*”). According to the evolution of ISO’s policies, these two Technical Reports are to be converted to official International Standards in the framework of the technical revision of their contents.

2.8 Commission VII: micro-joining and nano-joining

Commission VII focuses on micro-joining, nano-joining, and related materials processing technologies that occur at the micro-/nano-scale. The goal of the commission is to

1) promote knowledge exchange on the latest progress in microand nano-joining research, particularly with respect to materials and process issues; 2) review general trends in micro-joining and especially nano-joining research for integration and assembly of microand nano-scale devices and systems; and 3) promote awareness about recent developments in microand nano-joining research and applications. Special attention is given to new industrial sectors such as micro-electro-mechanical systems (MEMS), medical implants, nano-scale devices and systems, etc. which are not significantly addressed in other IIW commissions.

2.8.1 Outlook

Over the last 10 years, novel methods and principles of micro-joining and, more significantly, nano-joining have evolved rapidly. Monitoring and promoting the applications of the micro/nano-joining is a primary goal of the commission. For example, advanced nano-joining materials, including metal nano-particle paste and nano-film, are applied to the packaging of power devices, and new nanojoining

technology is applied to the research and development of high-performance micro/nano-devices. The future goal of C-VII is to attract more industry participants to the IIW Annual Assembly and to solicit industry-relevant papers for publication in *Welding in the World*. There are still many technical challenges to be overcome in nanojoining, including acquisition of heat sources at nanoscale, precise location and efficiency of nano-joining, performance testing of joint quality, and reliability evaluation.

2.9 Commission VIII: health, safety, and environment

Health, safety, and the environment are all critical considerations for any application or process involving welding. Many potential hazards can be present in the welding workplace, some of which include electric shock, fumes and gases, explosions, fires, burns, eye hazards, and noise. Although welding is intrinsically safe when proper safety precautions are followed, the welder and other personnel within the weld zone must have the information, training, and knowledge to assess these hazards and counteract them appropriately. As a result, the welding industry has a long track record of health and safety based on the development of guidelines for safe welding practices and welder safety programs.

IIW C-VIII is an interdisciplinary network that regularly reviews, exchanges and shares knowledge and general trends in international and national regulations, laws, and rules, and develops best practices/guidelines and statements that can affect health, safety, and the environment regarding exposure to physical and chemical agents in welding.

Historically, health and safety hazards were recognized in the early days of the 20th century and one of the first commissions set up by IIW in 1948 was C-VIII, originally named “Hygiene and Safety.” The 1980’s was a particularly active time in C-VIII and IIW held a very successful *Colloquium on Health and Safety* that addressed many of the problems facing the welding industry.

Throughout the 1990’s and into the 2000’s and beyond, IIW C-VIII member experts continue to discuss and debate the health, safety and environment welding related concerns to develop best practices/guidelines and statements. As an example, important documents including 1) *IIW Statement on Manganese, Chromium and Manganese in Welding*, 2) *Health and Safety in Fabrication Repair of Welded Components, Aspects, Impacts and Compliance to Regulations*, 3) *Lung Cancer and Arc Welding of Steels*, and 4) *Arc Welding of Steels and Pulmonary Fibrosis* have been published through the work of the commission. A complete list of documents can be found at <http://iiw-welding.org/iiw-resou-rce-materials>.

Welding fume and the exposure limits continue to be the topics of most interest within the commission. Some specific recent presentations included comparing the effects of acute MMA fume inhalation, quantifying the efficiency of technical measures for welding fume protection, fume emission during laser welding, modeling the fume emission rate of GMA welding, and reducing fume exposure of welders.

Welding industries in need of information/guidance/ best practices and specific welding industry segments of focus are shipbuilding, any confined spaces, production welding—in facilities or confined spaces, facilities incorporating multiple welders, fume extraction/mitigation, general PPE regarding electrical shock mitigation, and general welding/cutting information regarding fire prevention. New products of interest are as follows: Collaborative Robots/COBOTS—need new and different safety information/guidance and standard references than automated robotic welding or manual welding and handheld laser welding (Fig. 10).

2.9.1 Outlook

In the near future, focus will be on updating the IIW Best Practices documents, reviewing health and safety training materials, and continuing attention to welding fume-related discovery. C-VIII will continue to interact with other commissions, particularly those that are process orientated, and to encourage attendance at commission meetings to all who have an interest in health, safety, and the environment as it applies to welding.

2.10 Commission IX: behavior of metals subjected to welding

Commission IX deals with a diverse range of materials, primarily focused on metals used in structural applications. Gaining new insights into the relationships among chemical composition, microstructure, and weldability is one of the challenging tasks of welding metallurgy as those three factors are often vary widely from those of the base metals. C-IX has

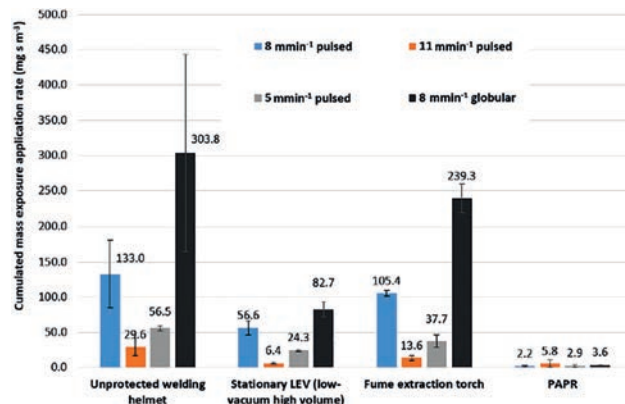


Fig. 10 Example of C-VIII work on weld fume exposure rates for different fume extraction conditions as a function of wire feed rates and transfer conditions (courtesy D. Werba)

made important contributions toward this goal in a variety of metallic materials, including high-strength lowalloy (HSLA) steels, heat-resistant Cr-Mo steels, stainless steels, Ni-base alloys, and non-ferrous alloys such as copper and aluminum. Special emphasis is given to the understanding and avoidance of welding defects during associated with welded structures and the associated service failures of welded joints and components. This is the essential behavior of metallic materials subject to welding, often referred to as “weldability.” In fact, the creation of C-IX in 1954 under the title of “Behavior of Metals Subjected to Welding” was the result of the amalgamation of earlier commissions on weldability and brittle fracture (see Table 1).

Over the years, C-IX has issued many recommendations concerning weldable structural C-Mn steels which have had a profound influence on international codes and specifications far beyond the purview of IIW. An example of this is the IIW carbon equivalent, CE(IIW), which is imbedded into many international standards. C-IX activities have also expanded to other metallic materials to cope with the change of industrial interests resulting in the current scope of materials listed above. Better understanding the factors controlling the weldability and service performance, such as for example the ferrite/austenite balance in duplex stainless steels, can enable the optimization of welding processes and the design of new materials to withstand severe service conditions. Based on the wide variety of materials considered and their implications with respect to design and process technology, the commission interacts with many of the other commissions, including C-I, C-II, C-IV, C-X, and C-XII.

2.10.1 Outlook

Metallurgical or weldability problems are normally encountered when the new processes or materials are developed and/or introduced into industrial use. Recently, for example, a major emphasis has been on laser-based and arc-based additive manufacturing (AM) processes. Because AM covers such a broad spectrum of processes and material types, C-IX will continue to include AM in its working program. There are also many new materials being introduced into a variety of industries that will pose weldability challenges. For example, improved battery efficiency will require new materials that must be joined in order to be of practical importance. Many other examples exist in the automotive, power generation, electronic, and defense industries. C-IX (in conjunction with C-II) will continue to be the focal point of metals technology and weldability within IIW (Fig. 11).

2.11 Commission X: structural performance of welded—fracture avoidance

The mission of Commission X is to establish practical procedures for assessing the strength and integrity

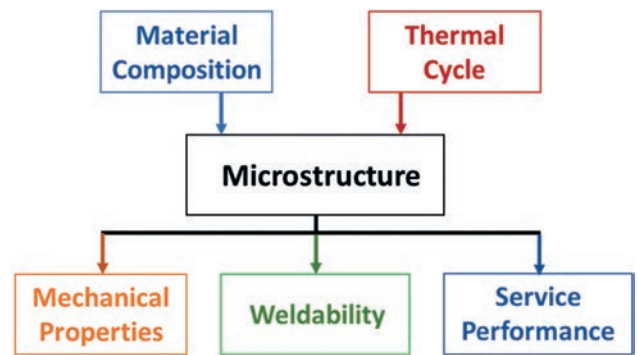


Fig. 11 Block diagram summarizing the evolution of weld microstructure and influence on properties and performance (courtesy J.C. Lippold)

of welded structures in design as well as in service, with attention to specific properties of welds such as welding residual stresses, strength mismatch, and toughness inhomogeneity in welds. Key activities of the commission have focused on the development of a practical guideline for fitness-for-service (FFS) assessment for welded components containing a flaw and damage, which includes stress/strain-based assessment, constraint analysis, and toughness testing procedures for welds. The FFS objective consists of specific subjects not covered by existing standards/guidelines, which operates as a “supplement,” which gives the state-of-the-art knowledge, advice, and/or recommendations on the structural performance assessment of welds with respect to avoidance of brittle, ductile, and environment induced fracture. With further development of FFS for welds, Commission X faces the challenge of advanced design of transport vehicles and infrastructures such as energy plants, pipelines, bridges, and buildings constructed with high performance steels and advanced welding technologies in a carbon neutral society.

2.11.1 Outlook

The commission FFS target and new, challenging, innovative research topics are summarized by the following:

- 1) Advancement of the current C-X FFS standard including additional new supplemental items:
 - K-solutions for welded joints
 - Limit load of weld joints (3D solution including mismatch effect)
 - Residual stress profiles for thick weld components
 - Constraint correction for welded joints (strength mismatch and residual stress effects)
 - Pre-strain/dynamic loading effects on weld components
 - Fracture toughness testing of welds (including small specimen test technique)
- 1) Pre-crack straightening treatment for CTOD test
- 2) Toughness requirement of butt welded joint of very thick plate
 - Strain-based assessment (strain-based FAD) for weld components

- Environment (hydrogen) induced fracture assessment for weld components

2) Development of new assessment tools together with an expansion of FFS target and new, challenging, innovative research items;

- Artificial intelligence (AI)/machine learning (ML)-assisted assessment tools (data-driven assessment) including 1) welding residual stress distributions and 2) mechanical/fracture toughness properties related to welding process parameters

- Simulation-based design and structural integrity assessment tools (FEA-based digital twin) including 1) welding mechanics simulation method and 2) physical-based fracture modelling (e.g., local approach)

3) Establishment of WG in C-X as well as in structural integrity group (C-V, IX, X, XI, XIII, and XV) for works of specific and timely topics leading to more effective, relevant and practical C-X FFS:

- A new initiative in AM (additive manufacturing) research by making a working group (or sub-commission) in C-X.

- Setting a new working group on “fracture toughness testing at cryogenic temperature.”

2.12 Commission XI: pressure vessels, boilers, and pipelines

The engineering technology for pressure vessels, boilers, and pipelines is of great importance in many industries. There are high potential risks of catastrophic failures due to the harsh service environments involving high pressure and/ or high temperature and also with complex loading. Commission XI and its sub-commissions deal with any aspects of pressure vessels and pipelines that can be impacted by welding throughout their life cycle. To improve the weld-related technology associated with pressure vessels, boilers and pipelines, C-XI provides a platform for disseminating experience and expertise from relevant academic, industrial, and professional organisations, regulatory agencies, and individuals. C-XI acts as an interface between the academic research and industry applications, to focus on the latest research and development results and related information on all its associated aspects, with particular emphasis on 1) advanced welding and inspection facilities, 2) technology and the underlying science, 3) integrity and safety assessment, and 4) maintenance and life extension of the welded pressurized engineering plants (Fig. 12).

2.12.1 Outlook

Besides placing emphasis on common industrial practices and scientific research, C-XI will continue to concentrate on the welding technology and performance of welds in the following areas (Fig 13).

- Performance of welds for hydrogen service: current and future activity will focus on the development of a practical guideline for structural integrity assess-



Fig. 12 Keystone pipeline in USA (courtesy TC Energy Corp.)

ment for welded structures and components in pressurized hydrogen gas environments and include the following topics:

- Effect of pressure variations on fracture and fatigue performance of high-pressure hydrogen pipelines.

- The inhibiting the effect of oxygen on hydrogen effects on pipeline steel.

- Effect of load frequency on fatigue performance of pipeline material in hydrogen environment.

- Fracture mechanics properties and fatigue properties of welded pipeline materials in hydrogen.

- Degradation of material properties of the welded natural gas pipeline in hydrogen.

- Feasibility of repurposing or potential uprating the local transmission system assets to convey hydrogen.

- Hydrogen embrittlement—fundamentals, modeling, and experiments.

- Permeation, diffusion, and solubility measurements.

- Composite technology for hydrogen pipelines.

- Recommendations/guidelines/standards for welding for hydrogen service.

- Welding facilities and technologies in harsh environments: special facilities and technologies are required for the welding and inspection of the pressurized structures and equipment operating in harsh environments, such as the underwater or offshore pipelines, in-service high-temperature boilers and pipes/tubes, nuclear pressure vessels, and coolant systems with dissimilar metal welds. Topics also include microstructure evolution and degradation and mechanical property deterioration of welds in harsh environments.

- Fracture mechanics-based structural integrity digital twin platform: C-XI has also identified a new challenging and innovative research topic for developing a new assessment tool—“fracture mechanics based structural integrity digital twin platform,” which will combine the artificial intelligence (AI)/machine learning (ML)-assisted data driven assessment and the NDT sensor and simulation -based structure integrity digital twin platform for pressure vessels, boilers, and pipelines. The concept is shown in the schematic below.

2.13 Commission XII: arc welding processes and production systems

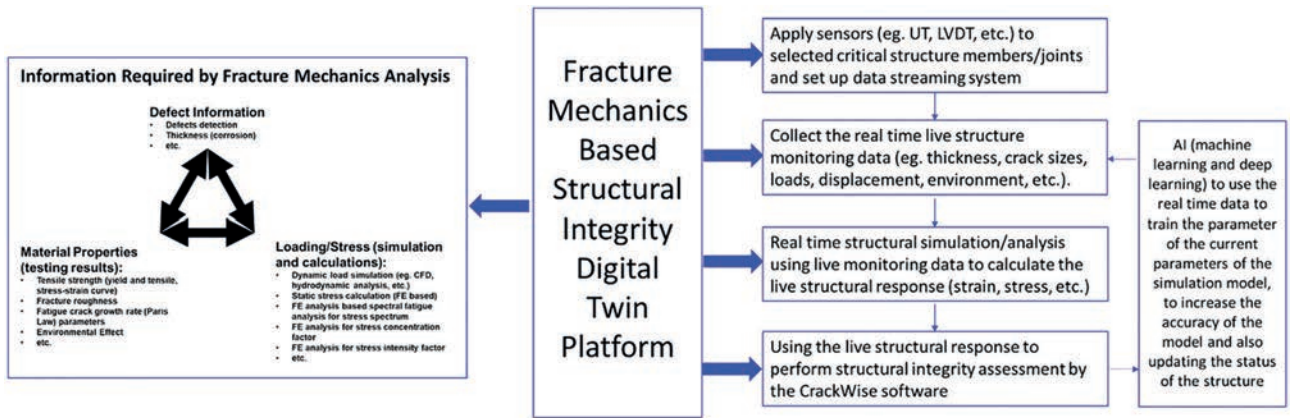


Fig. 13 Fracture mechanics-based structural integrity digital twin platform

Commission XII covers the application of arc welding process to various fabrication fields and the production systems for various industry sectors to realize low cost production with high quality. In 2021, SG-212 “Physics of Welding” was disbanded and established as a new sub-commission in C-XII. Therefore, fundamental issues of arc physics were now covered in C-XII. Good practices presented at Commission XII can be spread worldwide and published as state of the art papers in *Welding in the World*.

Commission XII currently consists of six sub-commissions, namely XII-A Sensors and Control, XII-B Arc Welding Processes, XII-C Production Systems and Application, XII-D Underwater Engineering, XII-E Quality and Safety in Welding, and XII-F: Physics of Welding (formerly SG212). Current topics under consideration by the commission are the following:

- High efficiency and high quality arc welding process.
- Robotic and automatic welding system with sensors and process control.
- Measurement and monitoring for quality control.
- Modeling and numerical simulation for arc physical phenomena
- Intelligent manufacturing, cyber-physical systems, and artificial intelligence
- Wire-arc additive manufacturing for innovative production

Also, Commission XII holds joint meetings with C-I and C-IV for obtaining and consolidating the latest information on additive manufacturing and welding processes.

2.13.1 Outlook

For the realization of innovative production, Commission XII will focus specifically on the areas of intelligent manufacturing with artificial intelligence and additive manufacturing based on fundamental issues of arc physics.

2.14 Commission XIII: fatigue of welded components and structures

Since its establishment in 1951, Commission XIII has been dealing with the challenges regarding the

structural integrity of welded components and structures under cyclic loading. C-XIII focuses on the newest scientific achievements on assessment methods and innovative technologies to avoid fatigue failures in welds.

The commission consists of the following working groups:

- WG1, fatigue testing and evaluation of data for design
- WG2, fatigue improvement and retrofit engineering techniques
- WG3, stress analysis
- WG4, effects of weld imperfections on fatigue strength
- WG5, life extension of welded structures by repair, retrofitting and structural monitoring (disbanded)
- WG6, residual stress effects in fatigue

The experts in different working groups of Commission XIII have developed a strong industrial research network to increase the awareness about the fatigue phenomenon and the methods to assess and avoid it. This network is being further developed by combining the interests of leading global companies and major international universities and research institutes. Industries which benefit from Commission XIII include aerospace, shipbuilding, rail transportation, bridges, and infrastructure, offshore, automotive, mechanical engineering, and process equipment. The commission also holds joint meetings with C-XV concerning fatigue effects on welded structures.

Commission XIII has developed and published a number of guidelines with high industrial relevance and impact for the welding community. These include 1) IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, 2) IIW Recommendations for the Fatigue Assessment of Welded Structures by Notch Stress Analysis, 3) IIW Recommendations on Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, 4) IIW Recommendations for the HFMI Treatment, 5) IIW Guidelines on Weld Quality in Relationship to Fatigue Strength, and 6) IIW Best

Practice Guideline for Statistical Analyses of Fatigue Results.

C-XIII is currently developing several new science-based guidelines that can be applied to challenging design and life extension cases. One of these documents which is under peer review is a best practice on “Retrofitting Engineering for Fatigue Damaged Steel Bridge Structures.”

Due to the high number of documents presented during the annual assemblies, C-XIII meetings often occupy 4 days. The papers and documents in C-XIII are of high standard and always well presented. Since the founding of the IIW journal 60 years ago, Commission XIII has been one of the leading contributors to *Welding in the World* and has recommended many high-quality research and engineering papers published in the journal. As shown in Fig. 4, C-XIII is among the leading commissions for publication of papers in WitW.

2.14.1 Outlook

The fundamental knowledge of weld fatigue as the original focus of C-XIII forms a solid basis supporting the development of guidelines and best practices to avoid fatigue failures in welds. C-XIII will transfer the available solid foundation of weld fatigue knowledge to the emerging additively manufactured parts as well for more structural safety. It will continue to serve as an important IIW platform for scientific discussions and exchange in a network of industrial partners and research institutes. It will continue to contribute high quality papers to the journal and publish Recommendations and Guideline documents regarding fatigue performance of welded structures relevant to industry.

2.15 Commission XIV: education and training

Commission XIV actively facilitates the sharing of best practices among Member Countries to promote welding standards, effective education and training methods, improved teaching techniques, educational research, and welding technology as a desirable career pathway. This commission focuses on global regulations, new education and training methods, digital and distance learning, training for intelligent manufacturing, education research, improving educator understanding of learning theory, safe welding practices, and the image of welding as a profession. It works in cooperation with the other Commissions to identify and present education and training solutions that help member countries prepare their work forces for skilled welding employment and welding professionals acting as engineers, technicians, and researchers, in a fast-changing world. There is an additional emphasis on the development of young professionals. Besides supporting existing methods, C-XIV also prepares its community for

emerging challenges, regardless of a member country’s level of advancement.

2.15.1 Outlook

Commission XIV will continue to be the focus of Education and Training within IIW. Among the agenda items for the commission over the coming years will be a) keeping pace with new technologies, b) identifying the right knowledge and skills needed to train current and future welding professionals, c) bringing awareness and useable solutions to address sustainable developments, and d) breaking down global barriers to facilitate consistent regulations for products, services, and people.

2.16 Commission XV: design, analysis, and fabrication of welded structures

Commission XV addresses the design, analysis and fabrication of welded structures, including buildings, bridges, offshore structures, and equipment, built primarily of structural steel, stainless steel, and aluminum. The commission is organized into six sub-commissions: analysis, design, fabrication, planar structures (buildings and bridges), tubular structures (both onshore and offshore), and economy, forming a matrix to facilitate exchange between specific technical topics and their applications in welded structures. In addition, there is a strategic effort to facilitate the exchange of information and possible harmonization regarding the national standards used for welded structures. Recent activities have focused on 1) design guidelines for welded structures subjected to seismic, impact or blast loads, 2) weld design and the welding of high strength structural steels, 3) advanced welding processes in the fabrication of structural steel, 4) fabrication quality requirements including the influence of flaws, welding residual stresses and distortion measurement, and 5) weld joint preparation standards, structural repair guidelines, and optimization and economy factors in design and fabrication.

C-XV has cooperated closely with industry groups in preparing design guidelines for welded joints in tubular structures subjected to both static loading and fatigue, with responsibility for two ISO standards on these topics. It also works closely with Commission XIII regarding fatigue effects upon welded structures, with a Joint Working Group and frequent joint meetings to facilitate the exchange of such information. It also cooperates with the other IIW working groups when their areas of activity have direct influence upon fabrication or performance of welded structures.

2.16.1 Outlook

For the future, Commission XV will expand their existing work to include components and structures produced using additive manufacturing, and the use of additional materials such as ultra-high strength steels (UHSS), stainless steels, and castings. The

manufacturing and welding of machinery and equipment will also be added. Applications using new and improved welding processes such as hybrid laser and electroslag welding will be addressed, as well as processes to apply protective coating systems. The study of seismic performance of welded connections in structures will continue.

2.17 Commission XVI: polymer joining and adhesive technology

Commission XVI focuses on the areas of polymer joining and adhesive technology. Both of these joining techniques are used in series production, which necessitates high automation levels. Polymers (and reinforced polymer materials referred to as composites) cover a broad range of materials, including plastics and natural polymers such as starches and woody materials, which primarily consist of cellulose. These materials are found in everyday life and impact the quality of life on many levels, including medical applications, food security, and cover many industries. One goal of the commission is to improve and expand the joining techniques for these materials, including the use of adhesives to join a wide range of materials.

The commission provides a forum for high-level discussions among the world’s leading scientists, who represent the very small scientific communities involved in material joining. These meetings highlight the development of novel materials and methods to join them, as well as novel techniques that expand the applications of polymeric materials. The commission also highlights fundamental principles for joining polymers, including complex flow models, temperature field prediction, and molecular diffusion models. These fundamental principles allow the community to further develop new joining methods and improve on existing ones. As additive manufacturing is fundamentally a joining technology, the scientists and engineers on the commission also focus on developing novel additive techniques, including hybrid systems. Developments over the past years have increased the importance of polymer joining and adhesive technology for application to modern hybrid materials and fiber-reinforced plastics (Fig. 14).

2.17.1 Outlook

The commission will continue to focus on the development of new technologies and material developments in several areas. This includes the following general areas:

- 1) Sustainable materials. Materials that are fully or partially derived from renewable feedstocks, such as starch, cellulose, or oil-rich biomass. It is important to note that this includes the development of sustainable composites as well as sustainable adhesives. These materials can be durable or easily digested by a natural pathway, such as composting or hydration.
- 2) Additive manufacturing. Technologies are growing on many levels, including the development of hybrid processes, new materials, and understanding.
- 3) Hybrid joining. Techniques that are based on the simultaneous or sequential use of traditional plastic joining technologies to allow the development of novel assembly and joining technologies.

The commission will also continue to address new developments of traditional polymer joining techniques, while continuing to assess the application of these emerging technologies to meet the needs of the future.

2.18 Commission XVII: brazing, soldering, and diffusion bonding

Commission XVII started its activities during the 2009 IIW Annual Assembly in Singapore. It comprises experts and delegates from several disciplines related to the metallurgical and mechanical property characterization of brazed, soldered or diffusion-bonded materials, components. In addition, new filler materials are identified and evaluated. The commission currently solicits a variety of contributions to achieve its work program including a) ceramic-to-ceramic and ceramic-to-metal brazing, b) wide gap brazing, c) brazing and diffusion bonding in microsystems, d) brazing of intermetallics, e) repair brazing, f) brazing of Al- and Ti-based alloys, and g) surface brazing. The commission also addresses testing, inspection and applications including, a) NDT of brazed and diffusion-bonded joints, b) applications of vacuum-brazed and diffusion-bonded joints as well

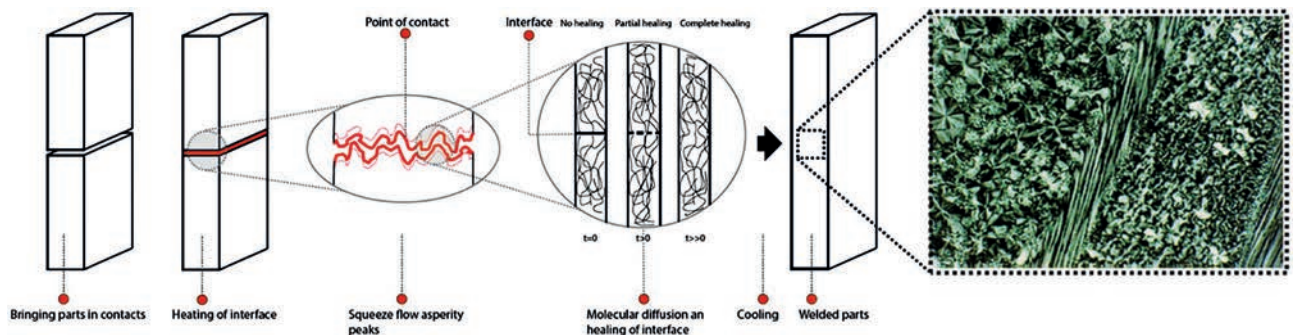


Fig. 14 Schematic of a polymer joining process (courtesy D. Grewell)

as dissimilar joints, c) development of new brazing filler metals, d) testing methods of brazed and diffusion-bonded joints (i.e., tensile, shear, stress rupture, bending, corrosion and erosion, and thermal shock, etc.), e) low-temperature brazing, f) weld/brazing (for e.g., MIG brazing, electron beam brazing, and laser brazing), and g) diamond and super-abrasive joining. In addition to the topics listed above, the process equipment used and its further development are considered, especially for diffusion bonding.

The depth and breadth of the work of the commission is reflected in the many papers recommended and published in *Welding in the World*. From 2020 through 2022, nearly 15% of the papers published in the journal were on topics associated with C-XVII. It is anticipated that this trend will continue in the future.

2.18.1 Outlook

The overarching goals of C-XVII are to advance the technologies of Brazing, Soldering and Diffusion Bonding and to expand research activities and improve productivity for a friendly and sustainable world. This is accomplished by the sharing of knowledge within worldwide community of IIW, support pioneering and basic research endeavors, and provide a platform for sharing successful experiences, new research achievements, new concepts and ideas, as well as technical difficulties and problems to be solved. As demands for energy supplies and storage increase, brazing, soldering and diffusion bonding will be applied more in the manufacture of new products. In particular, diffusion bonding is gaining importance for gas storage and transportation. Even the concepts of 3D-printing will lead to increased usage of the processes covered by Commission XVII. In addition, an updated work program for soldering is being developed.

2.19 Commission XVIII: quality management for welding and allied processes

Commission XVIII maintains the goal to identify, create, develop, and transfer global best practices in the field of quality management for welding and allied processes. This includes quality management systems, the qualifications for personnel and companies involved in welding and allied processes, and standards that are needed in these fields. In its work, the Commission acts as an interdisciplinary body within the IIW, working with other Commissions to develop industry quality management documents and standards for use by technical experts, quality managers, and production personnel.

C-XVIII was formed in 2016 from a Select Committee on the subject that was initiated in 2001. This permitted the work of its members to expand to include the development and maintenance of welding and joining related ISO standards that were not addressed in ISO/TC 44 or other Technical Committees. The Commission is currently organized with three sub-commissions: XVIII-A Quality Personnel,

XVIII-B Quality Management Systems, and XVIII-C Quality Management Standards.

The Commission has produced numerous documents to guide and assist industry in welding management, including “Improving the Quality and Effectiveness of Welding by Utilizing the Standard ISO 3834—Guideline for Company Implementation,” “Index of Welding Quality Management System Requirements used Globally in Arc Welding Applications,” “IIW Recommendations and Best Practices for Welding Inspection—Tasks and Responsibilities,” and “Recommendations and Best Practices for Welding Coordination to ISO 14731—Tasks and Responsibilities.” In addition, the Commission worked cooperatively with Commission XVII Brazing, Soldering, and Diffusion Bonding to create new standard ISO 22688 “Brazing—Quality requirements for brazing of metallic materials” and now manages the standard.

2.19.1 Outlook

C-XVIII will continue its work to guide, assist, and improve welding and joining quality management as it applies to industry practices and industry personnel. It will also continue working to develop and improve existing qualification standards and guidelines for welding personnel and for companies, with a careful eye for the needs of new joining processes and new developments in existing processes. This work also supports the work being done within the IIW International Authorization Board (IAB) and other organizations.

Commission XVIII will also be performing comparative studies of industry practices, with a goal for developing new and improving existing best practices. This includes the harmonization of audit criteria and practices for welding company audits. Because the Commission is interdisciplinary and includes representation from industry, standards bodies, and certification bodies, from a diverse array of nations and regions, it will be working to address the needs of all constituents in welding and allied processes for quality management and improvement.

3 Summary and outlook

As IIW celebrates its 75th anniversary, it stands as the leading international organization promoting welding, joining, and allied technologies. Initially established as a primarily European technical society, its membership now includes over 50 countries and 65 member societies from around the world. The organization has undoubtedly far exceeded the expectations of its founders.

To sustain this success, IIW must continue to evolve and react to the changing world environment. This includes global challenges to the environment that will require more efficient, agile and “green” manufacturing processes. In 2023, IIW launches a new strategic plan that will focus specifically on these and other issues associated with advanced manufacturing. Included in this plan are aspects of artificial

Table 3 List of IIW commissions and Chairs

Commission	Chair	Contact
C-I, additive manufacturing, surfacing and thermal cutting	Doug Kautz	doug.kautz@iiwelding.net
C-II, arc welding and filler metals	Zhuyao Zhang	zhuyao.zhang@iiwelding.net
C-III, resistance welding, solid-state welding and allied joining processes	Jorge dos Santos	Jorge.SANTOS@iiwelding.net
C-IV, power beam processes	Herbert Staufer	Herbert.STAUFER@iiwelding.net
C-V, NDT and quality of welded products	Marc Kreuzbruck	marc.kreuzbruck@iiwelding.net
C-VI, terminology	Jérôme Dietsch	j.dietsch@iiwelding.net
C-VII, micro-joining and nano-joining	Guisheng Zou	guisheng.zou@iiwelding.net C-VIII, health, safety, and environment
C-X, structural performance of welded joints fracture avoidance	Mitsuru Ohata	mitsuru.ohata@iiwelding.net
C-XI, pressure vessels, boilers and pipelines	SuJun Wu	sujun.wu@iiwelding.net
C-XII, arc welding processes and production systems	Satoru Asai	satoru.asai@iiwelding.net
C-XIII, fatigue of welded structures and components	Kenneth MacDonald	Kenneth.MACDONALD@iiwelding.net
C-XIV, education and training	Carl Peters	carl.peters@iiwelding.net
C-XV, design, analysis, and fabrication of welded structures	Stefano Botta	stefano.botta@iiwelding.net
C-XVI, polymer joining and adhesive technology	David Grewell	david.grewell@iiwelding.net
C-XVII, brazing, soldering and diffusion bond	Huaping Xiong	huaping.xiong@iiwelding.net ing
C-XVIII, quality management in welding and allied processes	Robert Shaw	robert.shaw@iiwelding.net

intelligence and intelligent materials joining which will be transformative in the very near future.

The new IIW strategy 2023–2028 describes an operational plan that is heavily reliant on IIW’s Technical Commissions. A substantial component of this strategy involves stronger participation by industry and will require implementing appropriate mechanisms for engineers and scientists from industry to take advantage of the expertise already established within the commissions. Under this plan, the needs of industry will be more directly reflected in the work plan of the commissions. It is envisioned that *Welding in the World* will be a key element in the new strategy, on the one hand competently continuing to focus on fundamental research, but progressively to encourage representatives from industry to share their work and advanced technology application results in a form that meets the standards of the journal.

Welding in the World will continue to play a major role in the evolution of IIW, serving as the outlet for much of the technical work conducted through the IIW commissions. As shown in Fig. 2, there has been a nearly 5-fold increase in the number of papers published annually over the last 20 years. In 2023, it is projected that the journal will publish over 200 papers and 3000 pages highlighting the many technical areas covered by the IIW commissions. In the future, more special issues and topical collections are anticipated to specifically target new developments, particularly those of important industrial relevance.

Such growth also brings challenges, and the Technical Management Board, Editors, and Editorial Board must be prepared to manage this growth while maintaining the high standards of the journal. The commission structure and its leadership will be the key to the continued success of *Welding in the World* since it is the work plan of the individual commissions and the technical papers that emanate from these commissions that will drive the journal. *Weld-*

ing in the World, subtitled “The International Journal of Materials Joining,” will continue as the technical “voice” of IIW and strive to maintain itself as the leading scientific journal for materials joining and allied technologies.

Appendix

Acknowledgments The authors wish to thank all the commission chairs who provided input for this article. A list of current chairs is provided in Table 3. Readers who wish to participate in the technical activities of IIW are encouraged to contact the chair of the relevant commission.

Declarations

Conflict of interest J.C. Lippold is the Lead Editor of *Welding in the World*. S. Egerland is the Chair of the Technical Management Board of IIW. R. Shaw is Chair of the TMB Subcommittee WG-TCOM and C-XVIII, Quality Management in Welding and Allied Processes. E. Raufelder is the Managing Editor of *Welding in the World*.

References

1. Boyd PD (1993) *Joining nations – a history of the International Institute of Welding*. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England.
2. Barnett D (2017) Linking people, joining nations – the impact of the International Institute of Welding since 1990. *Int Inst Weld*.
3. *Courtesy Laserline GmbH* (2023) <https://www.laserline.com/en-int/laser-additive-manufacturing/>.
4. Yu HZ et al (2018) Non-beam-based metal additive manufacturing enabled by additive friction stir deposition. *Scripta Mater*. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.03.025>.
5. Patterson T, Hochanadel J, Sutton S, Panton B, Lippold J (2021) A review of high energy density beam processes for welding and additive manufacturing applications. *Weld World*, 65(7):1235–1306.

Permission of Luca Costa, Chief Executive Officer International Institute of Welding, 28 August 2023.

Fronius WeldCube Navigator. Повний контроль над кожним швом



Зварювати без помилок і з високою ефективністю дуже просто: з новим програмним забезпеченням Fronius WeldCube Navigator тепер доступний цифровий план послідовності виконання зварювальних операцій для TPS/i. З ним зварювальник зможе виконувати всі завдання з обробки певної деталі максимально точно та безпечно. WeldCube Navigator поєднує в одному ПЗ дві основні функції: відповідно до робочих інструкцій контролер послідовності дає зварнику ілюстровані покрокові вказівки стосовно того, що і як потрібно зробити, та автоматично вибирає в системі попередньо налаштовані параметри зварювання. Потрібні робочі інструкції можна легко перевести в цифровий формат у редакторі ПЗ.

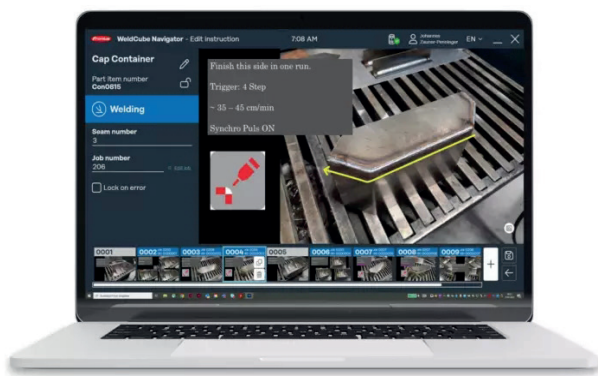
За допомогою добре продуманого плану послідовності виконання зварювальних операцій компанії можуть оптимізувати процеси ручного зварювання під час серійного виробництва. Для кожного завдання найкраща послідовність задається як стандарт, а уніфікований і структурований підхід забезпечує правильне виконання всіх кроків із визначеними допусками. Це не тільки гарантує високу якість швів, але й заощаджує час і кошти під час виробництва. WeldCube Navigator дає новачкам змогу швидко освоїти необхідні навички та працювати на рівні з професіоналами, а досвідченим зварникам – можливість з легкістю використовувати різні робочі станції, не витрачаючи час на вивчення інструкцій, навіть якщо якісь деталі потрапляють у роботу досить рідко.

Зменшення кількості помилок. Висока якість зварювання є критично важливою для багатьох деталей. Недостатньо якісні зварні з'єднання або їх відсутність там, де вони конструктивно передбачені, призводить до значного зростання вартості виробництва. Що раніше буде виявлено помилки в процесі виробництва, то швидше буде вжито заходів. І тут стане в пригоді WeldCube Navigator, а саме його функція надання інструкцій і попереднього визначення параметрів завдання: якщо зварник відхиляється від плану послідовності виконання зварювальних операцій, відразу подається аварійний сигнал. Якщо ж на шві виявляється відхилення (недотримання лімітів), яке порушує параметри безпеки, WeldCube Navigator автоматично блокує процес зварювання, після чого розблокувати його зможе тільки відповідальна особа, наприклад, керівник. Це означає, що помилки не повторюються і не дублюються, а відразу виправляються. Так забезпечується висока якість попри великі обсяги виробленої продукції, а кількість браку або виправлень значно зменшується.

Простота й зручність у експлуатації. Зварювальна система з програмним забезпеченням WeldCube Navigator становить собою самодостатнє комплексне рішення. Спеціалісти Fronius приділили особливу увагу зручності використання. Просто завантажте зображення в редактор і введіть потрібну інформацію. Так можна заздалегідь налаштувати всі важливі параметри зварювання й реакції системи на подію відхилення від плану. Звісно, можна також ін-



Цифровий план послідовності виконання зварювальних операцій допомагає заощадити час і кошти, забезпечуючи однаково високу якість шва під час виготовлення кожної деталі. Ви нічого не забудете й не робитимете помилок, що значно зменшить кількість браку та виправлень під час виробництва



Унаочнення – запорука швидкого розуміння: на екрані відображається кожен шов, усі налаштування та важливі примітки до кожного етапу, а функція зворотного зв'язку попереджатиме користувача про помилку, щойно ту буде допущено

тегрувати загальні робочі кроки, зокрема, підготовку чи проміжні етапи, які не передбачають зварювання.

Контролер послідовності допомагає зварнику в безпечний спосіб досягнути бажаного результату за цифровим планом послідовності виконання зварювальних операцій у редакторі. Зварювальник може з легкістю керувати послідовністю операцій просто на пальнику: вибирати, підтверджувати й виконувати певні дії. Екран робочої станції чітко показує кожен етап і не дає переходити до наступного, поки не буде повністю та з належною якістю виконано попереднє завдання. У результаті письмові інструкції, зазвичай написані різними мовами, відходять у минуле. Крім того, повідомлення про системні помилки надсилаються відразу оператору, що зменшує кількість помилок і знижує необхідність переробляти завдання, а отже, заощаджує час і матеріали. Це покращує процес з економічної та екологічної точки зору й буде корисним, якщо фахівці зі зварювання відсутні або часто змінюються.

Стандартизація: ефективне рішення для забезпечення належної якості. Новачки та недосвідчені зварники можуть швидше та ефективніше вчитися

Ми є *Fronius*. У нас працює більш ніж 7000 працівників по всьому світі, частка експорту в нашому виробництві складає 87 %, а портфоліо наших винаходів і розробок нараховує 1446 активних патентів. Наша компанія була започаткована у 1945 р. як маленький приватний бізнес, а нині ми є потужним гравцем на світовому ринку, що підтверджує розвинена структура з 37 міжнародних дочірніх компаній та потужна мережа торгових партнерів у більш ніж 60 країнах світу. Та все ж по суті своїй залишаємося австрійським сімейним підприємством, яке працює в галузях виробництва та обслуговування фотовольтаїчних систем, зварювальних апаратів, а також технологій заряджання акумуляторних батарей. Наші товари та рішення завжди були спрямовані на формування гідного майбутнього, а замовники отримують комплексні пакети обслуговування: від професійного планування та надання консультацій до постійного моніторингу ефективності та ремонту обладнання відповідно до їхніх потреб. Ми створюємо інновації. Ми відкриті для всього нового. Ми є *Fronius*.



Навігація через зварювальний пальник: для пересування пунктами цифрового плану послідовності виконання зварювальних операцій можна скористатися кнопкою пальника, яка дає змогу вибирати, підтверджувати й виконувати операції

за допомогою цифрового плану послідовності виконання зварювальних операцій, просто дотримуючись наочних покрокових інструкцій на екрані. Це дає змогу переконатися, що всі операції виконуються відповідно до вимог і стандартів. Жодна дрібниця не залишиться поза увагою, а параметри зварювання буде визначено заздалегідь. Завдяки цифровому плану послідовності виконання зварювальних операцій компанії можуть сконцентрувати знання та професійні навички зі зварювання в одному центрі й передати їх усім співробітникам. Це забезпечує безперервне виробництво та знижує залежність від досвідчених майстрів.

Максимально гнучке керування даними та користувачами. WeldCube Navigator – ще одне важливе рішення в асортименті програмного забезпечення *Fronius*. Використовуючи наше ПЗ в поєднанні з функціями централізованого реєстрування й аналізу даних та централізованого керування користувачами WeldCube Premium, компанії можуть ще більше розширити кількість функцій і переваг для свого бізнесу, щоб максимально розкрити свій зварювальний потенціал.

Для отримання додаткової інформації звертайтеся до
 Fronius Ukraine GmbH, Lilya Korzin
 вул. Слави, 24, с. Княжичі, Київська обл.
 Тел.: +380 (44) 2772141
 korzin.lilya@fronius.com

ЛЮДИНА, ЯКА ПРИЙШЛА З МАЙБУТНЬОГО

Пам'яті В.М. Глушкова



24 серпня 1923 р., 100 років тому, народився Віктор Михайлович Глушков – видатний вчений та громадський діяч, широко відомий у нас та за кордоном, засновник Інституту кібернетики Національної академії наук України, активний учасник світового процесу становлення та розвитку нових напрямків науки ХХ та ХХІ ст. – обчислювальної техніки, кібернетики, інформатики.

Його внесок у ці напрями науки коротко охарактеризував колишній Президент НАН України академік Б.Є. Патон:

«В.М. Глушков як мислитель вирізнявся широтою та глибиною наукового бачення, своїми роботами випередив час, ставши основоположником інформаційних технологій в Україні та колишньому Радянському Союзі, та й у світі загалом.

Віктор Михайлович мав величезні різнобічні знання, а його ерудиція просто вражала всіх, хто з ним спілкувався. Вічний пошук нового, прагнення прогресу в науці, техніці, суспільстві були відмінними його рисами.

В.М. Глушков був справжнім подвижником у науці, що мав гігантську працездатність і працьовитість. Він щедро ділився своїми знаннями, ідеями, досвідом з оточуючими його людьми.

В.М. Глушков зробив великий внесок у розвиток АН УРСР, будучи з 1962 р. її віце-президентом. Він суттєво впливав на розвиток наукових напрямів, пов'язаних із природничими та технічними науками. Великий його внесок у комп'ютеризацію та інформатизацію науки, техніки, суспільства.

Віктора Михайловича сміливо можна віднести до державних діячів, які віддавали себе служінню вітчизні, своєму народу. Його знали та поважали люди у всіх куточках колишнього Радянського Союзу. Він не шкодував сил для пропаганди досягнень науки, науково-технічного прогресу, спілкувався з вченими багатьох зарубіжних країн. Його роботи та досягнення керованого ним Інституту кібернетики АН УРСР були добре відомі за кордоном, де він мав заслужений авторитет.

Добре розуміючи значення обороноздатності своєї країни, В.М. Глушков, разом із керованим ним інститутом, виконав великий комплекс робіт оборонного значення. І тут він завжди вносив своє, нове, долаючи численні труднощі, іноді про-

сте нерозуміння. Він справді вболівав за країну, її і науці віддав усе своє чудове життя».

В.М. Глушков був нагороджений багатьма орденами і почесними званнями, відзначений Ленінською премією, Державними преміями СРСР і УРСР.

Він був одним з ініціаторів створення факультету кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка. З 1965 р. до дня своєї смерті очолював кафедру теоретичної кібернетики за сумісництвом.

В.М. Глушков опублікував понад 800 робіт, у т.ч. 30 монографій.

В.М. Глушков фундатор наукової школи кібернетики. Створив теорію цифрових автоматів і теорію автоматичного проектування комп'ютерів (1964). Започаткував українську школу з проблем штучного інтелекту й розпізнавання образів. Під його керівництвом розроблено принципи оцінки ефективності систем математичного забезпечення обчислювальної техніки, створено і впроваджено у практику математичного забезпечення ЕОМ «Київ» (1961). Створив проект ЕОМ «Україна» (1966); серію ЕОМ «Мир» (1968); системи автоматизації проектування «Проект» та машини «Київ-67» і «Київ-70» для керування іонним променем (1977). Автор проекту загальнодержавної автоматизованої системи збору й оброблення інформації.

Здавалося б, науковий і життєвий шлях академіка В.М. Глушкова був щасливим і безхмарним. Насправді ж, як людина відповідальна і небайдужа, він хотів не лише внести значний вклад в кабінетну науку, а й бачити практичне застосування своїх розробок. Але часто наражався на нерозуміння чи просто небажання розуміння з боку чиновників тоталітарної командно-адміністративної системи.

Ось деякі факти з життя вченого:

Віктор Глушков вів родовід від кубанських козаків. Бабуся вченого жила на Донбасі та розмовляла українською мовою. Від неї він дізнався безліч українських пісень, вважав їх найкрасивішою музикою та любив співати на сімейних урочистостях та у колі колег.

В.М. Глушков володів німецькою та англійською мовами. Знав напам'ять багато поетичних текстів. Одного разу на суперечку кілька годин поспіль читав по пам'яті німецькою Фауста та інші вірші Йоганна Вольфганга Гете.

У 1960-х роках під керівництвом вченого створили прототипи персональних комп'ютерів, а також розробили ідею безготівкового розрахунку населення – прообраз електронних грошей.

В останні дев'ять днів життя В.М. Глушков, будучи вже не в змозі працювати, диктував дочкам спогади про своє життя та наукові проекти, дотримуючись власного головного принципу – не гаяти часу.

ПЕРЕДПЛАТА 2024

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

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

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

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

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

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

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

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

На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2022 рр.



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



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



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

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

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

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

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

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

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

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: 38044 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>