

З Автоматичне Зварювання 2024

Автоматическая сварка

Видається з 1948 р.

Automatic Welding

Published since 1948

ЗМІСТ

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Перепичай А.О., Лагодзінський І.М. Вплив GMAW-CMT та PULSE процесів адитивного наплавлення кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 на формування поверхні, структуру та напружено-деформований стан виробів.....3

Шаповалов Є.В., Коляда В.О., Новодранов А.С., Мангольд А.М., Толчев Д.Д. Отримання металевих виробів з використанням роботизованої дугової 3D технології.....12

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА ОБРОБКА

Лобанов Л.М., Пащин М.О., Міходуй О.Л., Тодорович Н.Л., Сидоренко Ю.М., Устименко П.Р. Розрахункове оцінювання впливу товщини зварних з'єднань сплаву АМг6 на їх напружено-деформований стан після електродинамічної обробки в процесі зварювання16

ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ

Шльонський П.С., Фенг Гао. Структура і механічні властивості біметалу титановий сплав Grade 12 – вуглецева сталь 16 Мп, отриманого зварюванням вибухом22

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Вігілянська Н.В., Цимбаліста Т.В., Кільдій А.І., Янцевич К.В., Іпатова З.Г., Васильківська М.А. Детонаційні покриття, отримані напленням легованих порошків на основі інтерметалідів Fe–Al.....26

ОХОРОНА ПРАЦІ

Левченко О.Г., Полухаров Ю.О., Гончарова О.М., Безушко О.М., Ільчук О.С. Вплив дисперсного та хімічного складу зварювальних аерозолів на їх токсичність31

ІНФОРМАЦІЯ

Максимов С.Ю., Голякевич А.А., Котельчук О.С. Сучасні тенденції розвитку виробництва матеріалів для дугового зварювання на виставці «ЗВАРЮВАННЯ І РІЗАННЯ – 2023» в Ессені.....40

ІЕЗ ім. Є.О. Патона: 1944–1960 роки.....52

Успішна сертифікація. «ДНІПРОМЕТІЗ ТАС» готується до нових викликів.....57

Центр сертифікації при УТ НКДТ сертифікує персонал з НК в Ізраїлі.....59

Виставка «RAILWAY INTERCHANGE 2023».....60

Корегування до статті з журналу «Автоматичне зварювання» №1, 2024, с. 27-32.....60

CONTENT

ADDITIVE TECHNOLOGIES

Perepichay A.O., Lahodzinskyi I.M. Study of the influence of GMAW-CMT and PULSE processes of additive deposition of silicon bronze CuSi3Mn1 on the geometric characteristics of the surface, structure and stress strain state of finished products.....3

Shapovalov E.V., Kolyada V.O., Novodranov A.S., Mangold A.M., Topchev D.D. Metal products manufactured with arc 3D robotic technology12

ELECTRODYNAMIC TREATMENT

Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mikhoduj O.L., Todorovych N.L., Sydorenko Yu.M., Ustymenko P.R. Computational Evaluation of the influence of the thickness of welded joints of AMg6 alloy on their stress-strain state after electrodynamic treatment in the process of welding.....16

EXPLOSION WELDING

Shlonskyi P.S., Feng Gao. Structure and mechanical properties of titanium alloy Grade 12 – carbon steel 16 Mn bimetal obtained by explosion welding22

PROTECTIVE COATINGS

Vigilianska N.V., Tsybalista T.V., Kildii A.I., Iantsevitch C.V., Ipatova Z.G., Vasylykivska M.A. Detonation coatings produced by spraying of alloyed powders based on Fe–Al intermetallics26

OCCUPATIONAL HEALTH

Levchenko O.G., Polukarov Yu.O., Goncharova O.M., Bezushko O.M., Ilchuk O.S. Influence of dispersed and chemical composition of welding aerosols on their toxicity31

INFORMATION

Maksymov S.Yu., Golyakevych A.A., Kotelchuk O.S. Modern trends in the development of production of arc welding materials at the fair «SCHWEISSEN&SCHNEIDEN – 2023» in Essen.....40

The E.O. Paton Electric Welding Institute: 1944–196052

Successful certification. Dneprometiz TAS is preparing for new challenges.....57

The certification center at US NDT certifies personnel from NDT in Israel.....59

Exhibition «RAILWAY INTERCHANGE 2023»60

Correction to the article from the journal «Avtomatychne Zvaryuvannya» № 1, 2024, p. 27-32.....60



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
І.В. Кривцун (головний редактор),
В.М. Ліподасв (штатний заст. гол. ред.)
О.М. Берднікова, В.В. Книш,
В.М. Коржик, Ю.М. Ланкін,
Л.М. Лобанов, С.Ю. Максимов,
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. Райсен, 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 банделроллю.
Електронна версія: 1800 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.
Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевідаються англійською мовою в журналі
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU:
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. Reisen, 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 «Avtomatychnе Zvaryuvannya» (Automatic Welding)
journal is republished selectively in English in
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj
Publisher is not responsible
for the content of the promotional material.

ВПЛИВ GMAW-CMT ТА PULSE ПРОЦЕСІВ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ КРЕМНІЄВОЇ БРОНЗИ CuSi3Mn1 НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНІ, СТРУКТУРУ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ВИРОБІВ

А.О. Перепічай, І.М. Лагодзінський

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

E-mail: perepichayandrey@gmail.com

Кремнієві бронзи типу CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) завдяки своїм властивостям досить широко застосовуються у машинобудівній, аерокосмічній та гірничодобувній промисловості. Враховуючи досить високу вартість кольорових сплавів на основі міді, актуальним є застосування технологій дугового адитивного синтезу (WAAM). Для запобігання перегріву та зниження рівня тепловкладення при наплавленні сплавів на основі міді, застосовують методи Cold Metal Transfer (CMT), та імпульсно-дугове наплавлення (Pulse процес). Результати досліджень пошарового наплавлення кремнієвої бронзи вказують на певну залежність геометричних характеристик, структурного складу та схильності до утворення дефектів від застосованого методу наплавлення (GMAW-CMT/Pulse). Наплавлення з короткими замиканнями забезпечує більшу висоту кожного валика ніж при імпульсній подачі струму (до 25 %), та зменшення ширини кожного валика відповідно. Однак нерівномірність поверхні також зростає. Зразок, наплавлений GMAW-Pulse методом, містить критичні дефекти у вигляді поперечних тріщин. Моделювання напружено-деформованого стану для імпульсного методу наплавлення вказує на критичне накопичення нормальних напружень розтягу, що у поєднанні з анізотропною структурою металу може бути причиною утворення тріщин. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: WAAM, GMAW, Cold Metal Transfer, імпульсно-дугове наплавлення, адитивні технології, CuSi3Mn1 , пошарове наплавлення

Вступ. Кремнієві бронзи CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) широко застосовують у хімічній, нафтопереробній та гірничодобувній промисловості завдяки високій стійкості до агресивних середовищ, пружності та антифрикційним властивостям. Виготовлення одиничних ремонтних деталей (втулок, шестерень) або відновлення вже пошкоджених, відкриває широкі можливості для застосування адитивних технологій (Additive Manufacturing) виготовлення заготовок під чистову обробку замість традиційних операцій механічної обробки. Адже досить висока вартість кольорових металів, і особливо мідних сплавів, диктує необхідність зменшення відходів механічної обробки в процесі отримання готової деталі чи виробу [1].

Адитивний синтез з використанням кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 вже був розглянутий у сфері використання концентрованих джерел тепла типу Non-Vacuum Electron Beam (NV-EBM) [2]. Однак, через високий коефіцієнт поверхневого відбивання міді та її сплавів, використання лазерного чи електронного променя є проблематичним [3]. Тому використання технологій WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) є виправданим з точки зору економічних показників: відносно низької вартості обладнання та практичної відсутності обмежень на габарити та форму синтезованих виробів.

Адитивне пошарове наплавлення CuSi3Mn1 можливо виконувати базовою технологією GMAW зварювання. Завдяки наявності у своєму складі активних розкислювальних елементів (кремній, марганець), кремнієва бронза CuSi3Mn1 добре піддається зварюванню та наплавленню, хоча і з деякими обмеженнями по товщині нанесеного шару матеріалу. У зв'язку з високою теплопровідністю міді та сплавів на її основі виникає потреба у використанні потужних концентрованих джерел нагріву. Водночас, висока текучість розплаву металу та досить значний коефіцієнт теплового розширення ($18 \cdot 10^{-6}$) у поєднанні зі значною [4] усадкою металу при кристалізації з рідкого стану створюють передумови накопичення значних залишкових напружень при багатопшаровому наплавленні. У свою чергу це може призвести до виникнення критичних дефектів у вигляді тріщин. Також надмірне тепловкладення призводить до структурного росту стовпчастих зерен з орієнтацією у напрямку відводу тепла, що веде до отримання анізотропних механічних властивостей. Для регулювання тепловкладення та уникнення надлишкового перегріву при наплавленні CuSi3Mn1 і отримання рівновісної зеренної структури, використовують різновиди GMAW способу: процес зварювання з короткими замиканнями Cold Metal

Перепічай А.О. – <https://orcid.org/0000-0002-8156-4515>, Лагодзінський І.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7986-9440>

© А.О. Перепічай, І.М. Лагодзінський, 2024

Transfer (CMT) та регулювання тепловкладення імпульсною подачею струму (Pulse процес).

Значна кількість досліджень присвячена GMAW-CMT наплавленням з використанням кремнієвої бронзи (CuSi3Mn1) як додаткового компоненту у тандемі з алюмінієвим сплавом AK5 (AlSi5-ER4043) з метою зниження вірогідності утворення інтерметалідних фаз та підвищення механічних властивостей готових виробів [5–7]. Однак, у праці [5] явно прослідковується проблема у вигляді надлишкового рівня залишкової усадки наплавлених шарів сформованого зразка, що призводить до відриву напавленої стінки від основи з міді. В праці [8] автори розглянули вплив параметрів режиму наплавлення (рівня тепловкладення) на формоутворення та зміни структури пошарового наплавлення CuSi3Mn1 . Авторами також встановлений факт збільшення твердості поверхні отриманих зразків при зростанні сили струму. Така поведінка, зокрема збільшення твердості кремнієвих бронз кардинально відрізняється від низьколегованих сталей [9]. Разом з цим, шорсткість (нерівномірність) поверхні зменшується зі збільшенням струму від 70 до 110 А, що є логічним, оскільки збільшується час існування розплаву зварювальної ванни і це сприяє кращому розтіканню рідкого металу та призводить до збільшення ширини валика [8].

В роботі [10] досліджено вплив методу наплавлення з короткими замиканнями (GMAW-CMT) та імпульсний режим (GMAW-Pulse) наплавлення на структуру зразків з використанням суцільного дроту CuSi3Mn1 . Авторами роботи [10] досить широко розкрита тема впливу механічного перенесення крапель електродного металу (GMAW-CMT процес) та безконтактного скидання крапель у момент імпульсної подачі струму (GMAW-Pulse процес) на структурні зміни під час кристалізації зварювальної ванни. Ними встановлено, що імпульсна подача струму призводить до локального перегріву рідкої зварювальної ванни зі значним градієнтом температур від поверхні розплаву до дна зварювальної ванни. Це спричиняє ріст довгих зерен стовпчастого типу при кристалізації металу, що викликає погіршення механічних характеристик вже напавленого металу. Використання GMAW-CMT наплавлення з короткими замиканнями навпроти, сприяє утворенню рівновісних зерен та їх подрібненню, що має позитивний вплив на механічні характеристики виробів [10].

Однак, в роботах [8] та [10] дослідження адитивного процесу проводились на деформованих режимах наплавлення (до 100...110 А) та досить малою кількістю напавлених шарів (до 5), що не дозволяє в повній мірі оцінити характери-

сти формоутворення поверхні і вплив на напружено-деформований стан готового виробу.

Інші наукові праці розглядають застосування присадок з CuSi3Mn1 лише у якості проміжного матеріалу для зварювання-паяння біметалевих композицій титановий сплав TC4 – аустенітна сталь E304 [11] та інших [12, 13] і не стосуються теми адитивного виготовлення виробів. Враховуючи малу кількість робіт з висвітленням повноцінного адитивного синтезу із застосуванням суто кремнієвих бронз CuSi3Mn1 методами GMAW-CMT та Pulse наплавлення, дослідження цього напрямку є актуальними.

Мета роботи – Дослідження можливості адитивного виготовлення об'ємних просторових виробів з кремнієвих бронз CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) із застосуванням дугових джерел тепла та їх різновидів у вигляді CMT та Pulse процесів і їх вплив на геометричні характеристики, структуру, схильність до утворення дефектів виготовлених зразків.

Завдання для досягнення мети:

- виконати аналіз літературних джерел щодо можливості використання кремнієвих бронз у процесах адитивного виготовлення виробів, схильності до виникнення дефектів, особливостей формо- та структуроутворення шарів металу напавленого із використанням дугових джерел тепла;
- виготовити зразки пошаровим дуговим наплавленням із застосуванням GMAW-CMT/Pulse методів дротом з CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) суцільного перетину у середовищі чистого аргону (100 % Ar) на підкладці з аустенітної нержавіючої сталі E304;
- дослідити геометричні характеристики поверхонь отриманих зразків;
- дослідити структурну будову напавленого металу зразків, отриманих GMAW-CMT/Pulse методами дугового наплавлення, та схильність до утворення дефектів.

Методика експериментів. Досліди з GMAW-CMT/Pulse наплавлення виконані на експериментальному стенді для зварювання прямолінійних швів (вісь X) з консолю для двохкоординатного (по осі Y, Z) позиціонування зварювального пальника (рис. 1, а). Використано зварювальне джерело Fronius TransPulse Synergic 2700 у тандемі з пальником PullMig CMT MHP 400i. Як і у попередніх дослідженнях [9], обрано стратегію наплавлення у зворотньо-поступальному напрямку по чергово для кожного шару (рис. 1, б). Дослідні роботи виконані на матеріальній базі ТОВ «Науково-Виробничий Центр «Плазер».

Дослідження пошарового синтезу виконувались на пластинах з аустенітної нержавіючої сталі AISI 304 (08X18H10) товщиною 6 мм. Пошарове наплавлення виконувалось електродним дротом суцільного перерізу CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) діаме-

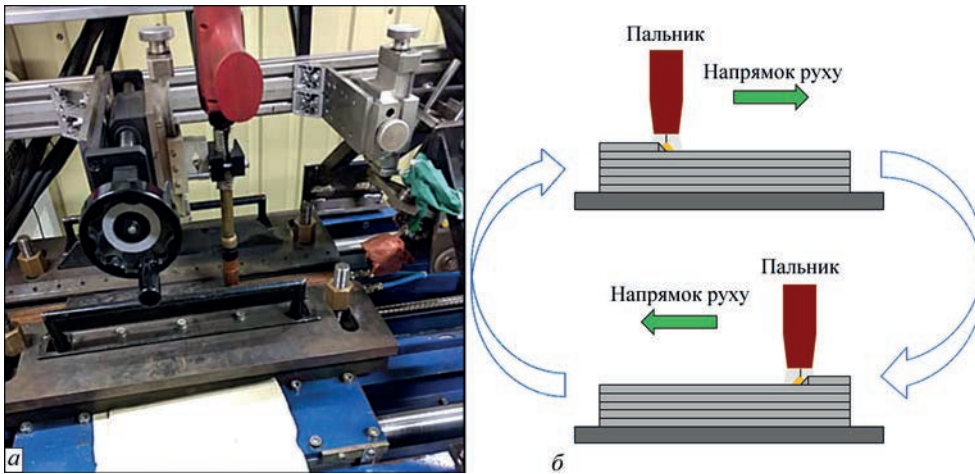


Рис. 1. Обладнання та методика наплавлення: а – стэнд для наплавлення прямолінійних швів; б – напрямок руху пальника при пошаровому наплавленні

тром $d_e = 1,2 \text{ мм}^2$. Наплавлення при обох GMAW-CMT та Pulse процесах здійснювали за однакової швидкості наплавлення ($V_{зв} = 600 \text{ мм/хв}$) та подачі присадного дроту ($V_{п.д.} = 3,5 \text{ м/хв}$). Захисний газ 100 % Ar.

Режими пошарового наплавлення зразків наведені в табл. 1. Погонна енергія та параметри режиму (струм, напруга) узяті за середнім арифметичним значенням, внаслідок складності відслідковування параметрів струму в момент імпульсної подачі (Pulse метод) та особливостей GMAW-CMT процесу з короткими замиканнями, описані в роботі [10].

Враховуючи поступове зниження тепловідводу в основу та акумуляцію тепла у попередніх шарах при почерговому нарощуванні шарів, обрано стратегію охолодження до 120°C після кожного шару. Це дозволяє виключити вплив надлишкового тепла на процес кристалізації та формоутворення кожного окремого шару, убезпечити вже наплавлені шари металу від надлишкового перегріву, що підтверджується результатами попередніх робіт [9, 10].

Зразки для досліджень макро- та мікроструктури були підготовлені методом вирізання зі сформованих стінок механічним шляхом із додаванням змащувально-охолоджувальної рідини для уникнення перегріву металу зі спотворенням його структури.

Для дослідження структури, зразки були підготовлені на високошвидкісних полірувальних кругах з використанням алмазних паст. Виявлення структури металу дослідних зразків проводили шляхом хімічного травлення в гарячому розчині

азотної (HNO_3), ортофосфорної (H_3PO_4) та оцтової (CH_3COOH) кислот у співвідношенні 10–30–60 % відповідно.

Дослідження структури виконували із застосуванням металографічного мікроскопу Neophot-32. Твердість фазових складових визначалась за шкалою Віккерса на твердомірі «LECO M-400». Навантаження складало 1Н (100 г), час прикладення навантаження 10 с. Цифрові знімки структур одержані за допомогою фотокамери «Olympus C-500».

Для аналізу напружено-деформованого стану (НДС) в наплавлених зразках, застосовано метод скінченних елементів. Моделювання включає побудову 3D скінченно-елементної моделі наплавлених зразків. В дослідженнях застосована модель типу рівностороннього трикутника зі стороною $l = 50 \text{ мм}$, що має ділянки зміни напрямку наплавлення. Це дозволяє оцінити вплив та розподіл нерівномірного теплового навантаження при наявності криволінійної траєкторії [14]. Геометрична модель зразка, граничні умови і скінченно-елементна сітка зображені на рис. 2.

За допомогою скінченно-елементної моделі проведено аналіз напружено-деформованого стану. Система рівнянь рівноваги розв'язувалася у серії малих кроків, починаючи від початку процесу друку і до охолодження зварного шва до температури навколишнього середовища. Кожен крок включав розрахунок приростів переміщень вузлів за допомогою методу ітерацій Ньютона. Після кожної ітерації оновлювалися дані про рівень деформацій і напружень, а також проводився роз-

Таблиця 1. Режими пошарового дугового наплавлення

Спосіб	Присадний дріт	Захисний газ	Погонна енергія, Дж/мм	Струм, А	Напруга, В	Діаметр сопла, мм	Швидкість подачі дроту $V_{п.д.}$, м/хв	Швидкість наплавлення $V_{зв}$, мм/хв	Витрати газу, л/хв
GMAW-CMT	CuSi3Mn1 (БрКМц3)	100 % Ar	125	131	12	16	3,5	600	15
GMAW-Pulse			192	120	20				

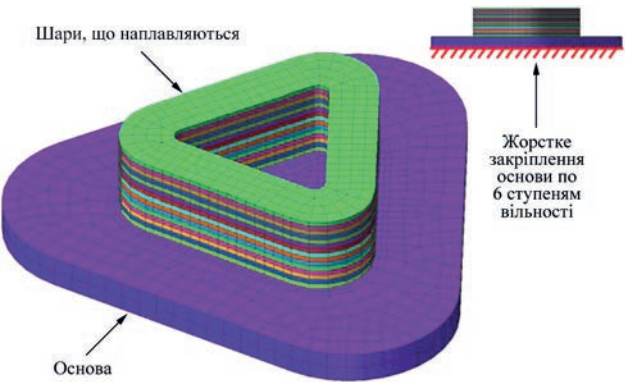


Рис. 2. Скінченно-елементна сітка та граничні умови для скінченно-елементного моделювання процесу GMAW-Pulse наплавлення

рахунок залишкової усадкової сили. У моделі використовувалась теорія пластичності з кінематичним зміцненням як характеристика поведінки металу. Такий підхід до моделювання забезпечив детальне розуміння та аналіз процесів, що відбуваються під час 3D наплавлення GMAW-Pulse процесом.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 4, 5 представлені результати аналізу залежності змін геометричних характеристик отриманих зразків з кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) від застосованого методу GMAW-CMT/Pulse наплавлення.

Для оцінки геометричних характеристик поверхні зразків, використано підхід з визначенням

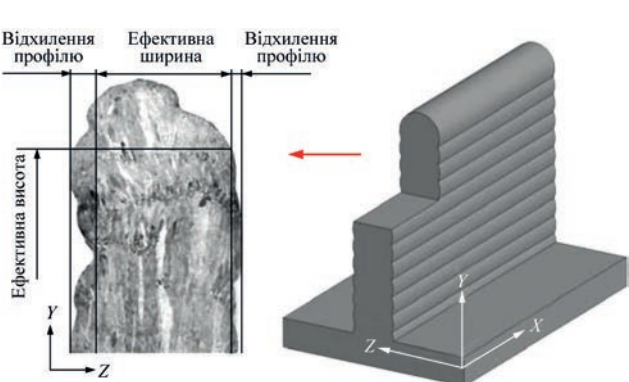


Рис. 3. Визначення параметрів ефективної висоти, ефективної товщини та максимального відхилення профілю [6]

параметрів ефективної висоти та ширини стінки зразка, що запропонований авторами в роботі [15] та використаний у попередніх дослідях з низьковуглецевими сталями [9]. Даний підхід дозволяє з досить високою точністю встановити долю корисного наплавленого металу виробу та відсоток металу, що йде на припуск для наступної чистої обробки. Максимальне значення відхилення профілю стінки симетрично від осі наплавлених шарів (рис. 3) дозволяє оцінити нерівномірність поверхні готового виробу. Максимальна ефективність використання металу досягається при мінімальних значеннях нерівномірності поверхні. Це особливо актуально при використанні кольорових металів, та мідних сплавів (CuSi3Mn1), у зв'язку з

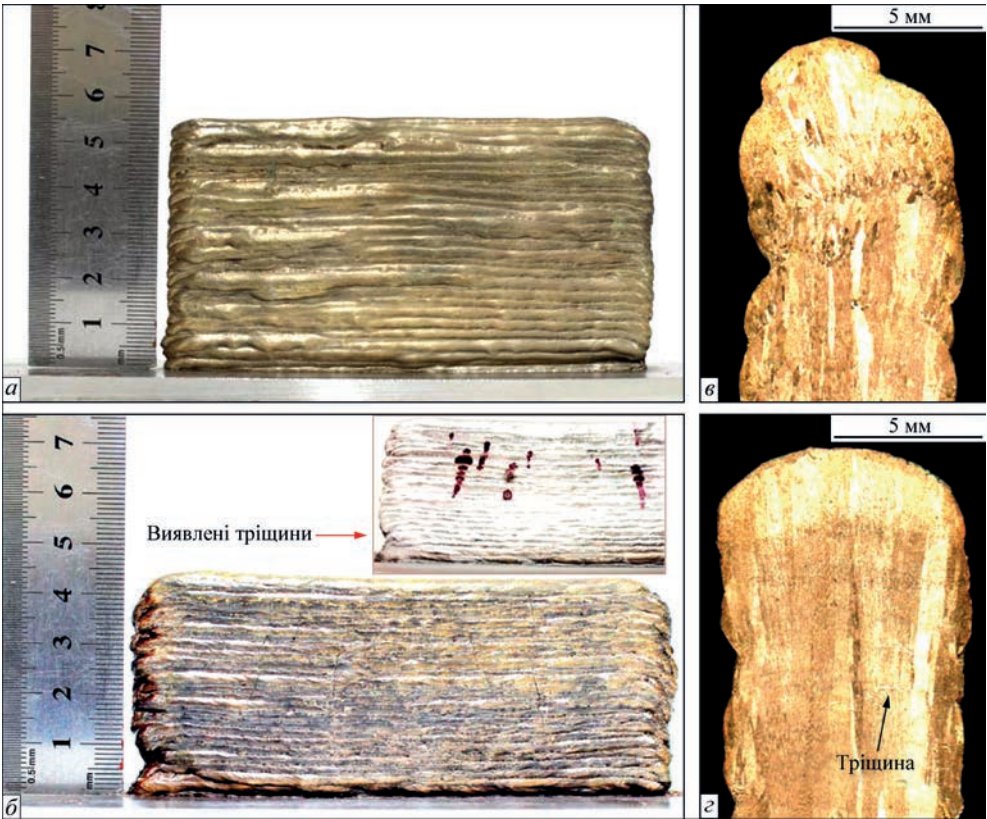


Рис. 4. Зразки кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 (БрКМц3-1), виготовлені різними методами наплавлення: а – GMAW-CMT; б – GMAW-Pulse з тріщинами, виявленими капілярною дефектоскопією; в – GMAW-CMT, макроструктура; г – GMAW-Pulse, макроструктура з наявними тріщинами у поперечному перерізі шліфа

їх високою вартістю в порівнянні з низьколегованими та низьковуглецевими сталями [12].

Висота 50-ти наплавлених шарів кремнієвої бронзи (CuSi3Mn1), зразків отриманих GMAW-CMT процесом (рис. 4, а) на 25 % більша (44,9 та 54,9 мм відповідно), при зменшенні ефективної товщини шарів з 9,75 до 8,5 мм у порівнянні з GMAW-Pulse процесом (рис. 4, б).

При GMAW-CMT методі наплавлення, поверхні стінок мають чітко виражені напливи закристалізованого металу окремих шарів, що призводить до збільшення показника відхилення профілю бокових поверхонь від 0,5 до 1,13 мм. Для GMAW-Pulse методу, показник нерівномірності менший, та лежить у межах 0,72...0,82 мм. (рис. 4, б). Загалом, показники залежності нерівномірності (рис. 5), ефективних ширини і висоти можна віднести до наслідків зміни рівня тепловкладення відповідно до застосованого GMAW процесу. Ступінь перегріву та час перебування зварювальної ванни у рідкому стані впливають на швидкість кристалізації зі зміною характеру розтікання металу зварювальної ванни.

У зразках, що виготовлені GMAW-CMT процесом, візуальним оглядом поверхневі дефекти не виявлені. Однак, при GMAW-Pulse методі наплавлення встановлене виникнення критичних дефектів. У процесі наплавлення після досягнення 32-го шару спостерігається виникнення тріщин, що розташовані перпендикулярно напрямку наплавлення (рис. 4, б, з). Подальше наплавлення нових шарів викликає появу тріщин як у них самих, так і у попередньо наплавлених шарах. Це може бути пов'язано зі значно більшим тепловкладенням при імпульсній подачі струму, ніж при GMAW-CMT процесі.

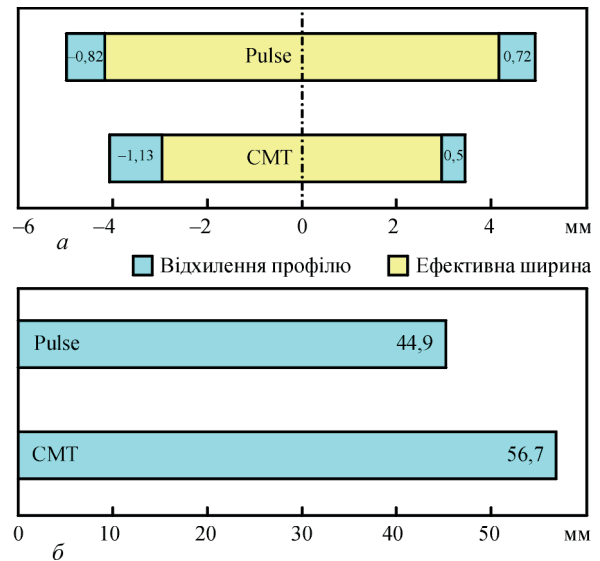


Рис. 5. Параметри залежності ефективної товщини стінок (а) та ефективної висоти (б) в залежності від методу адитивного GMAW-CMT/Pulse наплавлення

Мікроструктурний аналіз зразків виконаний на шліфах з охопленням трьох зон наплавлення: останнього шару наплавлення, перехідної зони сплавлення останнього та попереднього шару, попередні шари.

На полірованій поверхні шліфів усіх досліджених зразків, в невеликій кількості виявлені дрібні неметалеві включення неправильної форми і одиничні прозори включення сіро-блакитного кольору, що походить на пори. Включення здебільшого спостерігаються вздовж центральної осі по всій висоті досліджених зон наплавлень (рис. 6, а-з). На поверхні зразка наплавленого GMAW-CMT методом критичних дефектів не виявлено. Механізм утворення силікатних включень у процесі на-

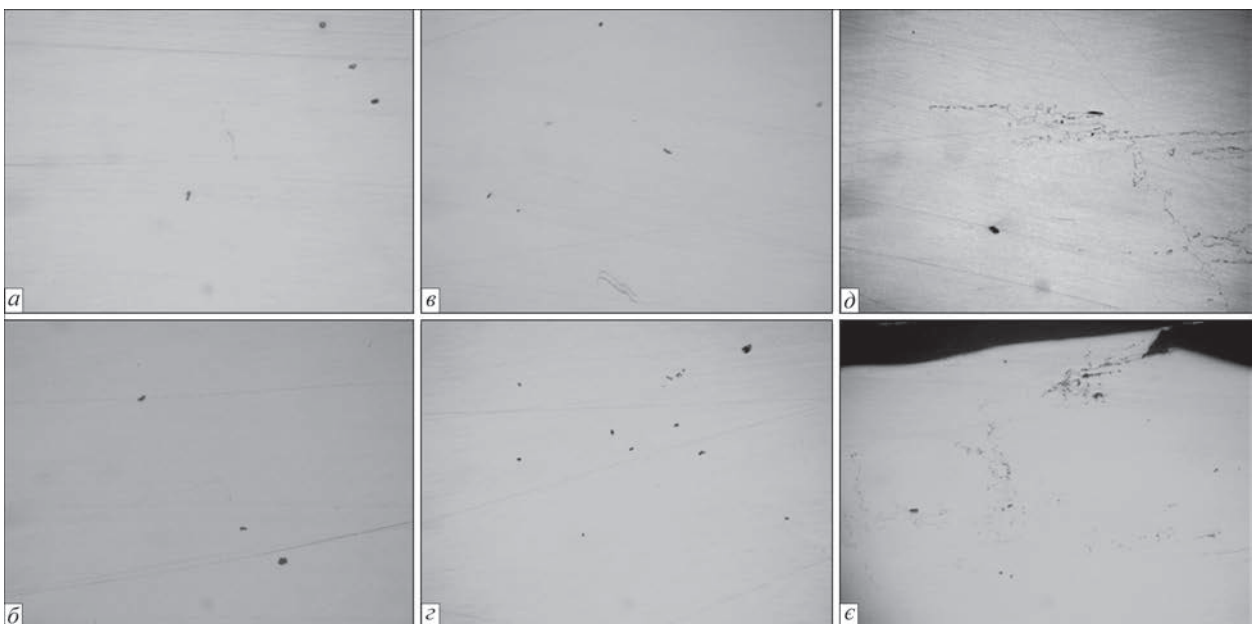


Рис. 6. Макроструктури ($\times 100$) зразків кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) виготовлених різними методами наплавлення: а, б – GMAW-CMT; в, з – GMAW-Pulse; д – GMAW-Pulse, тріщина в товщі металу зразка; е – GMAW-Pulse, розтріскування від бокової крайки валика

плавлення бронз описано в роботі [16], та пояснюється перепавленням тонких плівок CuO і SiO_2 , що утворились внаслідок потрапляння у розплав зварювальної ванни адсорбованого кисню з попереднього наплавленого шару.

На поверхні зразка, наплавленого GMAW-Pulse, виявлені численні мікротріщини як навколо бокової крайки (рис. 6, *e*), так і ближче до центру наплавленого валика. Також, спостерігаються мікротріщини, що починаються на відстані приблизно 6000 мкм від верхнього краю наплавленого валика і закінчуються на ділянці останнього шару (рис. 6, *d*; рис. 8, *a*, *b*).

Метал зразків, виготовлених GMAW-CMT/Pulse методами наплавлення, складається з α -твердого розчину. Для GMAW-CMT методу структура останнього шару характерна для багатошарових наплавлень: стовпчаста структура литого металу, яка вказує на направленість кристалізації, і являє собою дрібну дендритну структуру (рис. 8, *a*). Структура перехідної зони складається з масивних зерен, витягнутих по висоті зразка та слідів первинної структури у вигляді переривчастих ланцюжків темних глобулярних виділень субзерен розміром 100...150 мкм та субструктур з вираженою орієнтацією (рис. 7, *b*). Структура попередніх шарів схожа з перехідною зоною та останнім шаром. Однак, в невеликій кількості з'являється структура з вираженою орієнтацією також і в світлих зернах (рис. 7, *e*).

Структура останнього шару зразків, отриманих GMAW-Pulse наплавленням, відрізняється від CMT процесу. В останньому шарі не спостерігається дендритної структури. В структурній будові наявні залишки литого металу у вигляді переривчастих смуг і світлої матриці. На деяких ділян-

ках світлої матриці спостерігається субструктура у вигляді пластин з вираженою орієнтацією (рис. 7, *z*). Структура перехідних шарів схожа на структуру характерну для GMAW-CMT наплавлення (рис. 7, *d*). Попередні шари мають схожу до попередніх зон структуру, наявні залишки литих кристалітів та масивні зерна з різним ступенем травлення (рис. 7, *e*). В більш темних зернах спостерігається субструктура така сама, як і у перехідній зоні сплавлення шарів.

На макрошліфі зразка (рис. 4, *z*), наплавленого з імпульсною подачею струму, можна спостерігати чіткі межі розділу окремих шарів з формуванням масивних стовпчастих зерен, що орієнтовані у напрямку тепловідводу. Така структура підтверджує висновки зроблені у роботі [10] відносно надлишкового перегріву зварювальної ванни з наступним утворенням анізотропної структури наплавленого металу. Потенційно, це може бути причиною виникнення критичних дефектів типу тріщин (рис. 8) при наплавленні достатньої кількості шарів з паралельним накопиченням незкомпенсованих напружень розтягу від усадки металу при кристалізації. Для GMAW-CMT процесу характерна деяка дезорієнтованість зерен структури (рис. 4, *в*).

Мікротвердість окремих зон металу наплавлених зразків наведена в табл. 2.

Мікротвердість окремих зон в цілому для Pulse наплавлення, відносно CMT методу, дещо збігається з висновками авторів, які наведені в роботі [8] у контексті збільшення твердості наплавленого шару при підвищенні тепловкладення.

Скінченно-елементне моделювання. У процесі створення виробів за допомогою багатошарового 3D друку, формування тріщин може бути результатом різних чинників. Одним із них є фор-

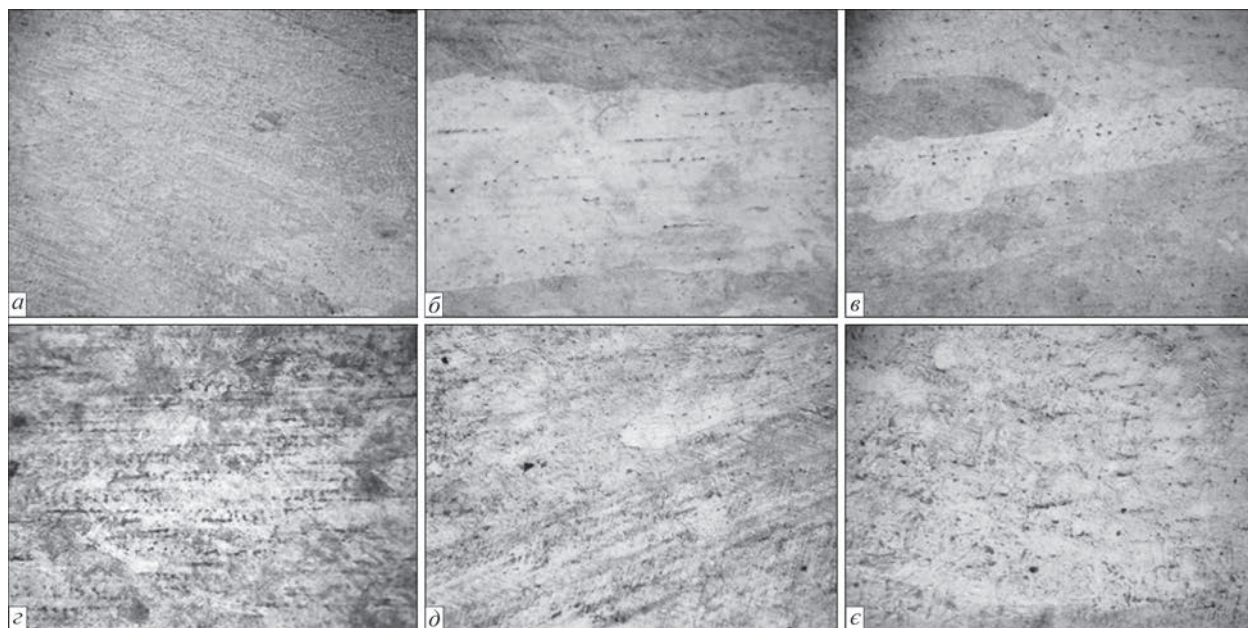


Рис. 7. Мікроструктури ($\times 800$) зразків кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 (БрКМц3-1), виготовлених різними методами наплавлення: *a*, *b*, *в* – GMAW-CMT; *z*, *d*, *e* – GMAW-Pulse; *a*, *z* – останній наплавлений шар; *b*, *d* – перехідна зона; *в*, *e* – попередні шари

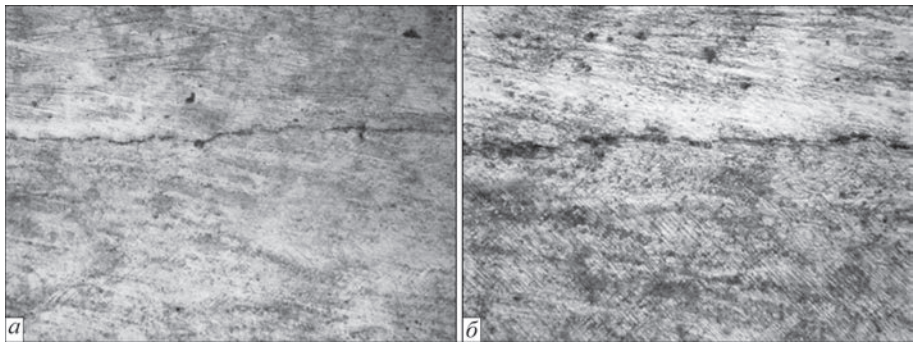


Рис. 8. Структури (×200) зон вздовж осі наплавлення GMAW-Pulse методом у перехідній області (а) та останньому шарі (б)

Таблиця 2. Середні значення зональної мікротвердості наплавлених зразків, МПа

Метод наплавлення	Останній шар	Перехідна зона	Попередні шари
CMT	1190	1120	1190
Pulse	1160	1450	1400

мування термічних напружень, які виникають через різницю температур між шарами під час наплавлення. Також важливу роль відіграють технологічні параметри процесу наплавлення, зокрема швидкість наплавлення, потужність джерела нагріву, послідовність нанесення шарів. Невідповідність будь-якого з цих параметрів може призвести до утворення тріщин та інших дефектів у готовому виробі.

Напружено-деформований стан наплавлених виробів залежить від кінетики термодформаційних процесів, що відбуваються при напавленні. В даний час в дослідницькій практиці для аналізу теплових процесів дугового зварювання і напавлення, в основному, використовується модель триви-

мірного джерела тепла Голдака [14] з нормальним розподілом питомої теплоти по всіх координатних осях в тепловому потоці, що має форму еліпсоїда.

Для аналізу напружено-деформованого стану та встановлення можливих причин утворення тріщин в зразках наплавлених GMAW-Pulse процесом, виконано скінченно-елементне моделювання пошарового наплавлення зразка з кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 на підкладку з аустенітної нержавіючої сталі.

Дослідна модель має наступні геометричні параметри: довжина сторони трикутника – 50 мм, товщина підкладки – 6 мм, кількість шарів – 15, висота шару (загальна висота) – 1 мм (загалом 15 мм). Матеріал що наплавляється – CuSi3Mn1, матеріал підкладки – аустенітна нержавіюча сталь AISI 304 (08X18H10).

Результати моделювання процесу наплавлення вказують, що при досягненні 13 – 15 шарів значно зростає рівень еквівалентних та поздовжніх нормальних напружень розтягу, що виникають

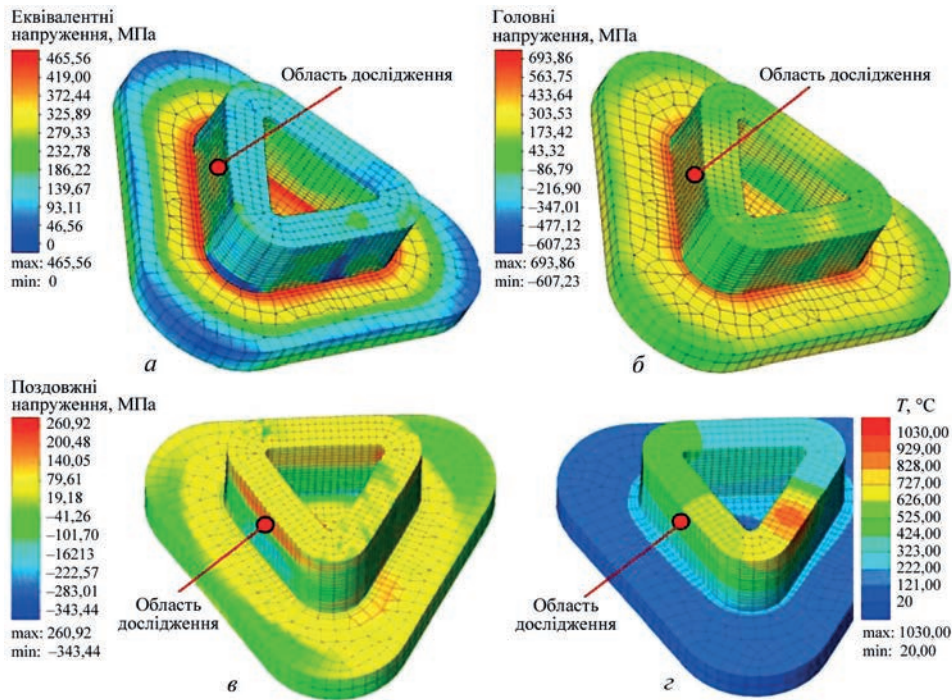


Рис. 9. Поля розподілу напружень та температур: а – еквівалентні напруження (МПа), б – максимальні головні напруження (МПа); в – нормальні напруження у напрямку вздовж напавленого шару (МПа); г – розподіл температур навколо ділянки утворення тріщини після напавлення 13 шару (°C)

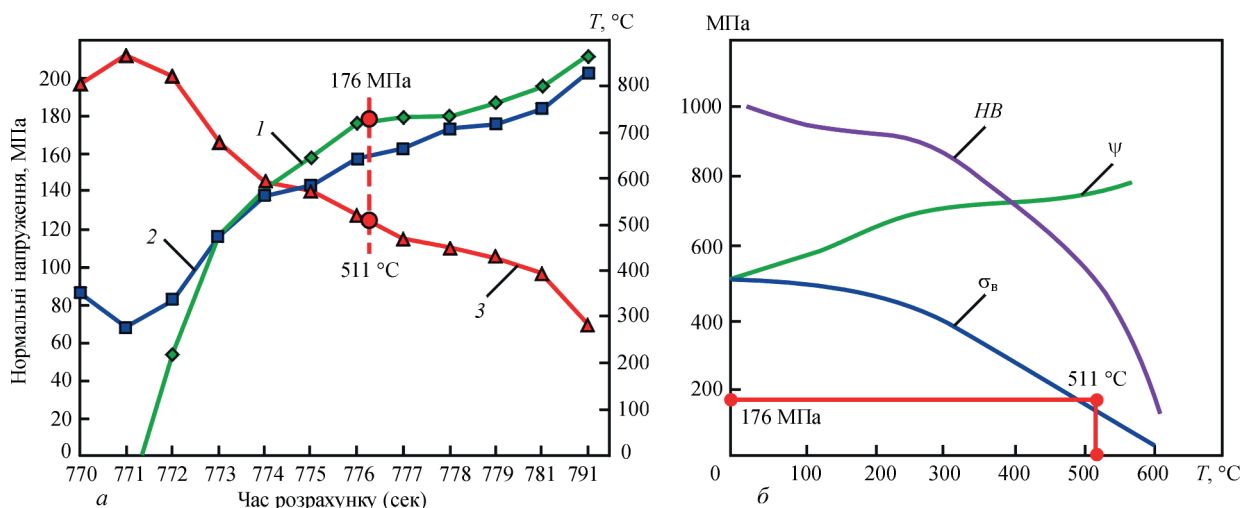


Рис. 10. Графік залежності нормальних (1), еквівалентних напружень (2) та температури (3) від часу після наплавлення для ділянки утворення тріщини (а); зміна механічних властивостей кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) від температури [4] (б)

вздовж траєкторії руху пальника внаслідок повторного нагріву попередньо наплавлених шарів у обраній області (рис. 10, а). В процесі багаторазового нагріву рівень поздовжніх напружень розтягу перевищує межу міцності бронзи $\sigma_b \approx 140$ МПа та сягає $\sigma = 176$ МПа, при фактичній температурі у точці близько 511 °С (рис. 9, в та рис. 10, а, б).

Даний ефект спостерігається внаслідок повторного нагріву попередньо наплавлених шарів теплом електричної дуги при накладанні наступного валика. Аналіз залежності величини та розподілу напружень від температури та часу (рис. 10, а) свідчить, що нормальні поздовжні напруження розтягу досягають границі міцності матеріалу у діапазоні температур 550...490 °С (рис. 10, б), що призводить до виникнення тріщин, виявлених при візуальних дослідженнях формоутворення та структури металу.

Висновки

Досліджені закономірності впливу GMAW методів наплавлення з використанням електричної дуги як джерела тепла на зміну геометричних характеристик, структуру, компонент напружено-деформованого стану та вірогідність виникнення дефектів при адитивному наплавленні кремнієвої бронзи CuSi3Mn1. Аналіз отриманих даних свідчить:

1. Метод наплавлення (GMAW-CMT/Pulse) суттєво впливає на геометричні характеристики наплавлених шарів. Найбільшу висоту та мінімальну товщину наплавлених зразків забезпечує метод GMAW-CMT, що пов'язано з меншим тепловиділенням у порівнянні з GMAW-Pulse методом. Зменшення тепловкладення призводить до зменшення глибини проплавлення в попередньо наплавлені шари, зниження температури металу зварювальної ванни, зменшення часу існування розплаву і як наслідок його розтікання.

2. При використанні GMAW-CMT процесу критичних дефектів у вигляді тріщин чи несплав-

лень не виявлено. Протилежний результат отримано при застосуванні дугового Pulse процесу при якому фіксується виникнення поперечних тріщин по усій довжині зразка, після досягнення 30-го наплавленого шару і вище. Геометрична форма кожного шару, у порівнянні з CMT процесом, має збільшену ширину та меншу висоту валика.

3. Аналіз мікроструктури металу зразків отриманих за обома технологіями наплавлення вказує на формування однофазної структури α -твердого розчину складного хімічного складу. В основному, структура обох наплавлень складається із масивних зерен з різним ступенем травлення та орієнтацією, що відрізняються твердістю. Мікротвердість зерен відрізняється на різних ділянках наплавлення та знаходиться в межах від 876...1280 МПа для CMT та 1160...1460 МПа для Pulse процесу.

4. Методом скінченно-елементного моделювання встановлено, що формування тріщин у зразках, виготовлених GMAW-Pulse методом, пов'язане з більшим у порівнянні GMAW-CMT наплавленням тепловкладенням, що призводить до суттєвого зростання рівня поздовжніх напружень розтягу, які сягають межі міцності матеріалу в інтервалі температур 490...550 °С.

Список літератури/ References

1. Ding, D, Pan, Z, Cuiuri, D, Li, H, Larkin, N. (2016) Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *J. of Cleaner Production*, 133, 942–952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.036>
2. Mukin, D., Valdaytseva, E., Hassel, T., Klimov, G., Shalnova, S. (2020) Modelling of heat transfer process in non-vacuum electron beam additive manufacturing with CuSi3 alloy wire. *Materials Today: Proceedings*, 30(3), 373–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.380>
3. Mukin, D.V., Ivanov, S.Yu., Valdaytseva, E.A., Turichin, G.A., Beniash, A.E. (2019) An Analytical Model for Filler Wire Heating and Melting during Wire Feed Laser Deposition. *KEM 822*, 431–437. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.822.431>
4. Spittel, Marlene, Spittel, Thilo. (2016). *Flow stress and plasticity of CuSi3Mn1*. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14174-4_62

5. Yanhu, W., Xizhang, C., Sergey, K. et al. (2019) In-situ wire-feed additive manufacturing of Cu-Al alloy by addition of silicon. *Applied Surface Science*, 487, 1366–1375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.068>
6. Kun, L. et al. (2019) Location dependence of microstructure and mechanical properties of Cu–Al alloy fabricated by dual wire CMT. *Materials Research Express*, 6(12). DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab583e>
7. Wang, Y., Kononov, S., Chen, X. et al. (2021) Research on Cu–6,6 % Al–3,2 % Si Alloy by Dual Wire Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 1694–1702. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05470-4>
8. Kazmi, K.H., Sharma, S.K., Das, A.K. et al. (2023) Development of Wire Arc Additive Manufactured Cu-Si Alloy: Study of Microstructure and Wear Behavior. *J. of Materials Engineering and Performance*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07972-9>
9. Квасницький В.В., Лагодзінський І.М. (2023) Вплив методів GMAW і PAW адитивного дугового наплавлення та складу захисного газу на геометричні характеристики поверхонь і структуру металу виробів. *Автомат. зварювання*, 11, 23–31. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.11.02>
10. Kvasnytskyi, V.V., Lahodzinskyi, I.M. (2023) Influence of GMAW and PAW methods of additive arc surfacing and shielding gas composition on surface geometry and metal structure. *Avtomatych. Zvar.*, 11, 23–31. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.11.02>
11. Baby, J., Amirthalingam, M. (2020) Microstructural development during wire arc additive manufacturing of copper-based components. *Welding in the World*, 64, 395–405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00840-y>
12. Gang, M., Xueming, H., Ye, H. et al. (2020) Study on the microstructure optimization and mechanical properties of dissimilar TC4–304L arc-brazing joints. *Materials Science and Engineering: A*, 788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139566>
13. Donghong, D., Zengxi, P., Dominic C. et al. (2016) Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *J. of Cleaner Production*, 133, 942–952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.036>
14. Yu, Z.S., Li, R.F., Zhou, F.M. et al. (2004) Joint evolution and strengthening mechanisms in arc brazed galvanized steels with Cu97Si3 filler. *Materials Science and Technology*, 20(11), 1479–1483. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708304225022133>
15. Kvasnytskyi, V., Korzyk, V., Lahodzinskyi, I. et al. (2020) Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials. *IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, pp. 02SAMA16-1–02SAMA16-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>
16. Gurcik, T., Kovanda, K., Rohan, P. (2019) Influence of shielding gas on geometrical quality of WAAM technology. *METAL 2019 – 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 715–721. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2019.871>
17. Mou, G., Hua, X., Wu, D. et al. (2017) Study on weld seam surface deposits of CuSi3 CMT brazing. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 2735–2742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0349-3>

STUDY OF THE INFLUENCE OF GMAW-CMT AND PULSE PROCESSES OF ADDITIVE DEPOSITION OF SILICON BRONZE CUSI3MN1 ON THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE SURFACE, STRUCTURE AND STRESS STRAIN STATE OF FINISHED PRODUCTS

A.O. Perepichay, I.M. Lahodzinskyi

NTUU «Igor Sikorsky Polytechnic Institute». 37 Beresteyskiy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: perepichayandrey@gmail.com

Silicon bronzes of CuSi3Mn1 type (BrKMts3-1) are widely used in the machine-building, aerospace, and mining industries due to their properties. Given the rather high cost of copper-based non-ferrous alloys, the use of wire-arc additive manufacturing (WAAM) technologies is relevant. Cold Metal Transfer (CMT) and pulse arc surfacing (Pulse process) are used to prevent overheating and reduce the heat input during surfacing of copper-based alloys. The results of studies of layer-by-layer surfacing of silicon bronze indicate a certain dependence of geometric characteristics, structural composition, and susceptibility to defect formation on the applied surfacing method (GMAW-CMT/Pulse). Short-circuit surfacing provides a greater height of each bead than with pulse current supply (up to 25 %) and a reduction in the width of each bead, respectively. However, the surface unevenness also increases. The sample deposited by the GMAW-Pulse method contains critical defects in the form of transverse cracks. The stress-strain state modeling for the pulse surfacing method indicates a critical accumulation of normal tensile stresses, which, in combination with the anisotropic structure of the metal, may be the cause of crack formation. 16 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

Keywords: WAAM, GMAW, Cold Metal Transfer, pulse arc surfacing, additive technologies, CuSi3Mn1, layer-by-layer surfacing

Надійшла до редакції 06.12.2023

Отримано у переглянутому вигляді 15.01.2024

Прийнято 23.02.2024



XXIII Міжнародна науково-технічна конференція

«ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ»

14 – 15 травня 2024 р., Київ, Україна

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Приладобудівний факультет, 03056, Київ, пр. Берестейський, 37, корп. 1

Реєстрація на сайті конференції

<http://conferences.uran.ua/> | <http://conferencepb.kpi.ua/conferencepb2024/>

ОТРИМАННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОБОТИЗОВАНОЇ ДУГОВОЇ 3D ТЕХНОЛОГІЇ

Є.В. Шаповалов, В.О. Коляда, А.С. Новодранов, А.М. Мангольд, Д.Д. Топчев

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: artur19940131@gmail.com
У роботі описаний спосіб формоутворення виробу за допомогою 3D технології з використанням дугового нагріву і витратного матеріалу – дроту діаметром 1,2 мм. Метою роботи є дослідження структури і механічних властивостей виробу, виготовленого за допомогою адитивної 3D технології. Кожен наплавлений шар складається з трьох окремих валиків: двох бокових, які забезпечують задані контури шару, і одного середнього, який заповнює простір між двома боковими. Електродугове наплавлення здійснювалось за допомогою зварювального робота. Застосування робота дало можливість контролювати час між наплавленням шарів, тим самим контролювати ріст зерен. Також застосування робота дає змогу максимально точно відтворити задану деталь по заздалегідь розрахованій та спроектованій моделі з мінімальною похибкою повторювання руху пальника $\pm 0,03$ мм. В результаті досліджено структуру і механічні властивості наплавленого виробу. Показано, що виріб виготовлений за наведеною технологією, має дрібнозернисту феритно-перлітну структуру, розмір зерна коливається у межах від 7 до 10 балів. Досліджено механічні властивості вздовж і поперек наплавлених шарів. Показники практично не відрізняються. Порівняння їх значень з нормативними показало, що вони перевищують нормативні на 10...50 %. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: 3D технологія, сталь марки 09Г2С, структура, електрична дуга, дрiт, адитивні технології, електродугове наплавлення, зварювальний робот

Вступ. Сьогодні 3D технології [1, 2] швидко поширюються світом і охоплюють різні сфери діяльності суспільства. У машинобудуванні за допомогою устаткування для 3D друку [3, 4] виготовляються вироби з різних металів і сплавів. Крім того, габарити виробів можуть значно відрізнятися, але всі вони мають виконувати певні функції, які забезпечуються у кожному конкретному випадку необхідними властивостями [5, 6]. Для значної частки металевих виробів визначальними можуть бути механічні властивості. При однаковому хімічному складі сплавів на механічні властивості впливає структура, яка може бути крупнокристалічною, дрібнокристалічною, змішаною або, взагалі, монокристалічною. Для виробів з полікристалічною структурою вважається найкращою однорідна дрібнокристалічна структура. Тому, при розробці адитивних технологій [1, 7] виготовлення виробів складної форми необхідно враховувати вплив параметрів процесу на формування структури.

Матеріали та методи. У експериментах як матеріал, який наплавляли, використовувався дрiт діаметром 1,2 мм марки Св08Г2С, хімічний склад якого наведено у табл. 1. Сталь цієї марки має феритно-перлітну структуру, є низьколегованою зі знизеним вмістом вуглецю (менше ніж 0,12 %). В

якості захисного газу було використано газову суміш М21 (80%Ag + 20%CO₂) із витратою 12 л/хв.

Виключно високі механічні властивості та висока термостійкість сталі у діапазоні температур від –70 до 450 °С дозволяють використовувати її в різних виробках відповідальних конструкцій – парове та нафтове обладнання, а також обладнання для зберігання рідини під тиском тощо.

У попередніх дослідженнях з використанням сталі марки 09Г2С при виготовленні деталей простої геометричної форми було доведено, що вибір певних режимів та застосування методів зменшення ліквіації в процесі наплавлення, таких як регулювання температури металу, що наплавляється, регулювання теплового поля на поверхні зварювальної ванни, електромагнітне

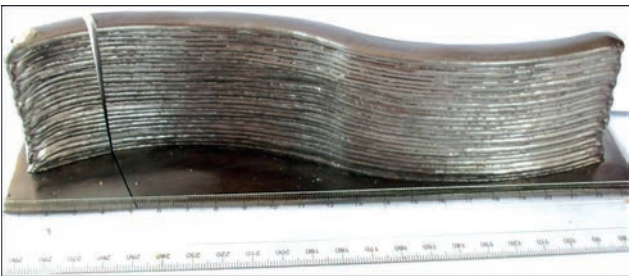


Рис. 1. Експериментальна деталь, отримана за допомогою 3D технології

Таблиця 1. Хімічний склад дроту Св08Г2С, мас. %

Si	Mn	C	Ni	S	P	Cr	N
0,7...0,95	1,8...2,1	0,05...0,11	Не більше 0,25	Не більше 0,025	Не більше 0,03	Не більше 0,2	Не більше 0,01

Шаповалов Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5063-9556>, Коляда В.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7539-6626>, Новодранов А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>, Мангольд А.М. – <https://orcid.org/0000-0003-0144-8512>, Топчев Д.Д. – <https://orcid.org/0000-0002-7885-7907>
© Є.В. Шаповалов, В.О. Коляда, А.С. Новодранов, А.М. Мангольд, Д.Д. Топчев, 2024

змішування, вібраційна та акустична обробка та інші дають змогу отримати однорідну структуру деталі [8, 9]. Деталь, структуру якої передбачається досліджувати, має складнішу форму (рис. 1).

В якості обладнання для наплавлення було застосовано зварювальний робот Fanuc ARC MATE 100 iC/7L та зварювальне джерело Fronius TPS 320i.

Металографічні дослідження проводились за методикою оптичної металографії з використанням мікроскопа зі збільшенням до $\times 1000$.

Виготовлення деталі. Шари наплавляли за три проходи. Перші два проходи формували бокові стінки деталі, а третій шар з коливанням дуги («розмазуванням» ванни) накладали всередині – заповнювали проміжок між першими двома шарами. Наплавлення шарів виконувалось за допомогою МАГ зварювання дугою постійної потужності у суміші захисних газів $Ar + CO_2$ з використанням роботизованої системи (рис. 2) [10]. Застосування зварювального робота надає низку переваг, серед яких підвищена точність повторення траєкторії наплавлення, контрольована величина часового проміжку між наплавленням шарів, а також гнучке перепрограмування на деталь іншого розміру або форми. Контроль температури попереднього наплавленого шару визначався за допомогою електронного пірометра, після зниження температури

нижче $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ робот починав наплавлення наступного шару. Технологічні параметри наплавлення наведені у табл. 2.

При наплавленні наступних шарів попередньо наплавлені шари будуть піддаватися термоцикуванню [11]. Це може відобразитися на початковій структурі і механічних властивостях. У даній роботі доцільно провести дослідження мікро- та макроструктури, а також механічних властивостей, які будуть отримані в кінцевому результаті. Зразки для дослідження вирізали вздовж і поперек наплавлених шарів. Величину зерна визначали методом оптичної мікрографії при збільшенні $\times 100$ та порівнювали з еталонним зображенням шкали згідно зі стандартом ISO 643:2019 [12].

Обговорення результатів. Дослідження макроструктури та мікроструктури виконано на шліфах, які були виготовлені зі зразка, що був відрізаний від експериментальної деталі (рис. 1). На макрошліфі (рис. 3) простежуються всі наплавлені шари. Кожен шар складається з трьох зон – двох бокових і середньої.

Неможливо встановити глибину проплавлення попереднього шару, але орієнтовно можна припустити, що вона становить $0,1 \dots 0,3\text{ мм}$ при товщині шару $1,8 \dots 2,0\text{ мм}$.



Рис. 2. Процес роботизованого наплавлення деталі



Рис. 3. Макрошліф наплавленої деталі

Таблиця 2. Технологічні параметри наплавлення шарів виробу

Вид операції	Сила струму, А	Напруга на дузі, В	Швидкість подачі дроту, м/хв	Швидкість руху дуги, мм/с	Амплітуда коливання, мм	Частота коливання дуги, Гц
Наплавлення 1-3 контурів шару	78,0	16,5	2,0	5,0	–	–
Наплавлення 4-го і усіх наступних контурів шару	66,0	16,0	1,8	5,0	–	–
Заповнення середини шару одним валиком	110,0	16,5	2,8	4,5	3,5	3,0

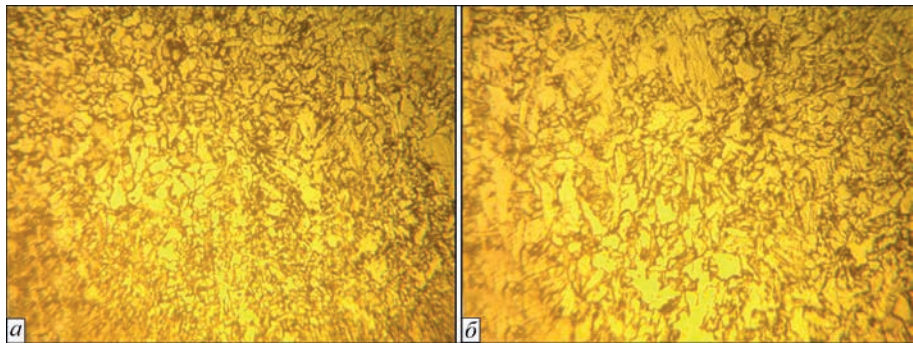


Рис. 4. Мікроструктура (×100) наплавленого шару: а – вздовж шару; б – поперек шару

Таблиця 3. Механічні властивості виробу при випробуванні на розрив за стандартом ASTM E8/E8M [14]

Сплав 09Г2С (відбір зразків)	Межа плинності, МПа	Тимчасовий опір розриву, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %
Вздовж шарів наплавленого металу	399,9	513,8	34,9	77,2
	400,1	515,8	33,0	77,4
	408,4	517,7	35,0	77,1
Поперек шарів наплавленого металу	405,9	514,7	30,7	77,1
	395,7	509,2	31,9	74,1
	398,8	514,0	30,8	76,5
Нормативне (стандартне) значення	345,0	441,1	21,0	—

Необхідно зазначити, що на шліфі відсутні грубі дефекти у вигляді пор, несплавлень тощо. Не зафіксовані також і великі зерна. Структура, при малому збільшенні, оцінюється як дрібнозерниста. Мікрографічне дослідження структури шліфа показало, що структура феритно-перлітна. По висоті і вздовж наплавлених шарів структура високодисперсна, неоднорідна і має різні за розміром зерна (рис. 4).

Неоднорідність структури спостерігається навіть у межах одного шару. Розмір зерен може коливатися в межах від 7 до 10 балу [13].

Неоднорідність структури не є ознакою високих показників міцності виробів. Крім того, на шліфі (рис. 3) прослідковуються контури нанесених шарів. Варто зазначити, що спостерігається різнозернистість. У зв'язку з цим, показники міцності виробу як у горизонтальній, так і у вертикальній площині можуть розрізнятися. Характер руйнування зразків, вирізаних як у вертикальній, так і горизонтальній площині, не розрізняється. Тобто, не виявлено вплив межі з'єднання шарів на механічні властивості. Значення показників міцності наведено у табл. 3.

Механічні властивості виробу, наплавленого за 3D технологією, значно вищі за нормовані показники для сталі 09Г2С. Для різних показників ці значення вищі на 10...50 %.

Висновки

- 1. Деталь, отримана за 3D технологією, має щільну феритно-перлітну структуру без пор і несплавлень.
- 2. Структура має різний розмір зерна. Розмір зерна коливається у межах від 7 до 10 балу, а його площа у межах 0,001...0,000125 мм².

3. Механічні властивості металу у поздовжньому і поперечному перетинах практично однакові та перевищують стандартні на 10...50 %.

Список літератури

- 1. ASTM-International, ASTM Standard F2792-12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
- 2. Dongaonkar, A.V., Metkar, R.M. (2018) Reconstruction of Damaged Parts by Integration Reverse Engineering (RE) and Rapid Prototyping (RP). *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171.
- 3. (2020) ALL3DP [Електронний ресурс]. *Metal 3d Printer Buyer's Guide*. <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing>
- 4. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding J.*, 5-6, 148–153.
- 5. Hemnath Anandan Kumar, Senthilkumaran Kumaraguru (2018) Distortion in Metal Additive Manufactured Parts. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 281–295.
- 6. Костин В.А., Григоренко Г.М. (2017) Особенности формирования структуры 3D изделия из стали S460M в аддитивной металлургической технологии. *Современная электрометаллургия*, 3 (128), 33–42.
- 7. Дорошенко В.С. (2014) 3D-технологии изготовления отливок как примеры аддитивного производства. *Металл и литье Украины*, 12, 4–9.
- 8. Шаповалов В.А., Григоренко Г.М. (2015) Подавление ликвационных процессов в крупных слитках. *Современная электрометаллургия*, 1, 26–30.
- 9. Шаповалов В.А. (2016) Применение сварочных технологий для подавления ликвации в крупных слитках. *Автоматическая сварка*, 5-6(753), 162–165.
- 10. Shapovalov, E.V., Dolinenko, V.V., Kolyada, V.A. et al. (2016) Application of robotic and mechanized welding under disturbing factor conditions. *The Paton Welding J.*, 7, 42–46.
- 11. Yadav, Anshul et al. (2019) Thermal Transport Phenomena in Multi-layer Deposition Using Arc Welding Process. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 15–27.
- 12. International Standards Office (2019) ISO 643 – Steels – Micrographic determination of the apparent grain size. ISO, Geneva, Switzerland.

13. ASTM E112-13 – *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.
14. ASTM E8 – *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.

References

1. ASTM-International, ASTM Standard F2792-12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
2. Dongaonkar, A.V., Metkar, R.M. (2018) Reconstruction of Damaged Parts by Integration Reverse Engineering (RE) and Rapid Prototyping (RP). *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171.
3. (2020) ALL3DP. *Metal 3d Printer Buyer's Guide*. <https://all-3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing>
4. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding J.*, 5-6, 148–153.
5. Hemnath Anandan Kumar, Senthilkumaran Kumaraguru (2018) Distortion in Metal Additive Manufactured Parts. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 281–295.
6. Kostin, V.A., Grigorenko, G.M. (2017) Peculiarities of formation of 3D structure of S460M steel product in additive metallurgical technology. *Suchasna Elektrometal.*, 3 (128), 33–42 [in Russian].
7. Doroshenko, V.S. (2014) 3D-technologies for manufacturing castings as the examples of additive production. *Metall i Li-tiyo Ukrainy*, 12, 4–9 [in Russian].
8. Shapovalov, V.A., Grigorenko, G.M. (2015) Suppression of liquation processes in large ingots. *Sovrem. Elektrometall.*, 1, 26–30 [in Russian].
9. Shapovalov, V.A. (2016) Application of welding technologies for suppression of liquation in large ingots. *The Paton Welding J.*, 5-6(753), 162–165.
10. Shapovalov, E.V., Dolinenko, V.V., Kolyada, V.A. et al. (2016) Application of robotic and mechanized welding under disturbing factor conditions. *The Paton Welding J.*, 7, 42–46.
11. Yadav, Anshul et al. (2019) Thermal Transport Phenomena in Multi-layer Deposition Using Arc Welding Process. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 15–27.
12. International Standards Office (2019) ISO 643: *Steels. Micrographic determination of the apparent grain size*. ISO, Geneva, Switzerland.
13. ASTM E112-13: *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.
14. ASTM E8: *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.

METAL PRODUCTS MANUFACTURED WITH ARC 3D ROBOTIC TECHNOLOGY

E.V. Shapovalov, V.O. Kolyada, A.S. Novodranov, A.M. Mangold, D.D. Topchev

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

E-mail: artur19940131@gmail.com

This paper describes the method of shaping the product using 3D technology by means of applying arc heating and consumable material – a wire with a diameter of 1.2 mm. The aim of the work is to study the structure and mechanical properties of the product manufactured using additive 3D technology. Each deposited layer consists of three separate beads: two lateral ones, which provide the set contours of the layer, and one middle one, which fills the space between the two lateral ones. Electric arc surfacing was carried out with the help of a welding robot. The use of a robot made it possible to control the time between layer depositions, thereby controlling grain growth. Also, the use of a robot makes it possible to reproduce a set part as accurately as possible according to a pre-calculated and designed model with a minimum error of repetition of the torch movement of ± 0.03 mm. As a result, the structure and mechanical properties of the deposited product were investigated. It is shown that the product manufactured according to the presented technology has a fine-grained ferrite-pearlite structure; the grain size ranges from 7 to 10 numbers. The mechanical properties along and across the deposited layers were studied. The indices practically do not differ. A comparison of their values with normative ones showed that they exceeded normative values by 10–50%. 14 Ref., 3 Tabl., 4 Fig.

Key words: 3D technology, 09G2S steel, structure, electric arc, wire, additive technologies, electric arc surfacing, welding robot

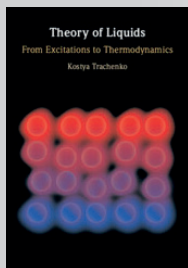
Надійшла до редакції 15.11.2023

Отримано у переглянутому вигляді 26.02.2024

Прийнято 18.03.2024

Передбачення температури плавлення матеріалів

Костя Траченко, який здобув ступінь доктора наук у Кембриджському університеті та магістра у Львівському, розробив нову теорію, яка вирішує давню проблему фізики – передбачення температури плавлення матеріалів. Його дослідження, опубліковане в журналі *Physical Review E*, є значущим кроком у розумінні фундаментальних властивостей матерії і фазових переходів. Протягом десятиліть учені стикалися з проблемою відсутності універсального опису лінії плавлення на фазових діаграмах температура-тиск. Але тепер теорія професора Траченка, заснована на останніх досягненнях у теорії рідин, пропонує просте параболічне рівняння для опису цієї лінії. Це означає, що температуру плавлення можна передбачити з використанням фундаментальних фізичних констант. «Простота й універсальність цього результату особливо цікаві», – пояснює професор Траченко. «Це передбачає, що плавлення, незважаючи на його складність, демонструє фундаментальну єдність різних систем, від благородних газів до металів». Робота Траченка отримала 10 найкращих нагород за прорив у фізиці та премію EPSRC-ССР за «видатний внесок у теорію і моделювання фаз конденсованої речовини, включно з теорією рідкого стану».



Theory of Liquids. From Excitations to Thermodynamics
Kostya Trachenko
Queen Mary University of London 2023, 300 стор.,
ISBN: 9781009355476



РОЗРАХУНКОВЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ АМГ6 НА ЇХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Міходуй¹, Н.Л. Тодорович¹, Ю.М. Сидоренко², П.Р. Устименко²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

²НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37

Проведено розрахункове оцінювання ефективності впливу електродинамічної обробки (ЕДО) на напружений стан стикових зварних з'єднань пластин із алюмінієвого сплаву АМГ6 при зростанні їх товщини δ . Виконано математичне моделювання кінетики і залишкових напружених станів стикових зварних з'єднань $\delta = 2, 4$ і 8 мм в результаті їх ЕДО за різних значень температури T пластин, за яких проводили обробку. Значення вертикальної швидкості V_0 електрода-індентора (інструмента ЕДО) приймали $V_0 = 5$ м/с, що відповідає сучасним електрофізичним характеристикам обладнання для ЕДО. Задавали значення T , що відображали умови виконання ЕДО після зварювання ($T = 20$ °С) та в процесі зварювання плавленням ($T = 150$ і 300 °С). Розв'язок задачі проводили в тривимірній постановці із використанням програми ANSYS. Умови формування напружень в пластинах при ЕДО після та в процесі зварювання задавали механічними характеристиками сплаву АМГ6 при температурах $T = 20, 150$ і 300 °С без врахування охолодження. Представлені результати розрахунку залишкових напружень в зварних з'єднаннях. Показано, що за значення $T = 150$ °С виконання ЕДО забезпечує найбільш оптимальні залишкові напружені стани пластин в усьому дослідному діапазоні δ . Доведено, що ЕДО в процесі зварювання (при $T = 150$ °С) є більш ефективною у порівнянні із ЕДО металу після вистигання ($T = 20$ °С). Встановлено, що при ЕДО зварних з'єднань $\delta = 2...4$ мм формуються залишкові напруження стиску по усій товщині пластин, значення яких близькі до межі плинності сплаву АМГ6. При ЕДО зварних з'єднань $\delta = 8$ мм залишкові напруження стиску формуються на зовнішній поверхні пластин, а на зворотній – розтягу. Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: електродинамічна обробка, залишкові зварювальні напруження, алюмінієвий сплав, імпульс електричного струму, ударна взаємодія, скінченно-елементна модель, електрод-індентор, теорія пружно-пластичної течії, зварювання плавленням

Вступ. Залишкові напруження негативно впливають на довговічність та корозійну стійкість зварних конструкцій із сплавів на основі алюмінію, тим самим знижуючи їх експлуатаційний ресурс. В світовій практиці спостерігається зростання об'ємів виготовлення таких конструкцій, що приходять на заміну виробам із високоміцних сталей. Враховуючи наведене, проблема зменшення залишкових напружень розтягу або формування напружень стиску в зварних з'єднаннях зі сплавів на основі алюмінію є актуальною. Традиційні технології керування залишковим напруженим станом (ЗНС) потребують застосування металоємного оснащення та (або) значних витрат енергії і не завжди відповідають вимогам сучасної інженерної практики [1, 2], яка потребує інноваційних енергозаощадливих підходів до виробництва.

Актуальність досліджень. Електродинамічна обробка (ЕДО) зварних з'єднань імпульсами електричного струму є інноваційним підходом до керування ЗНС зварних конструкцій, який базується на застосуванні імпульсних електромагнітних полів та їх похідних [3–6].

Доведено, що підігрів зони електроімпульсного впливу до температури T стимулює механізми релаксації ЗНС [7]. Це спонукає до розробки технологій застосування ЕДО у поєднанні із процесом зварювання. Експериментально доведено, що реалізація ЕДО при підвищеній T в процесі зварювання сприяє більш інтенсивній релаксації ЗНС в результаті ЕДО у порівнянні із обробкою металу шва при кімнатній T [8].

Але електрофізичні характеристики існуючого обладнання для ЕДО забезпечують значення накопиченої енергії E_c (значення E_c є визначальною характеристикою ефективності ЕДО) ємнісного накопичувача C , які не перевищують $1,0$ кДж. Це спонукає до оцінювання граничних можливостей застосування ЕДО, як засобу ефективного впливу на ЗНС зварних конструкцій. Як відомо з результатів попередніх експериментальних досліджень, ефективність ЕДО знижується зі зростанням товщини δ металу, що підлягає обробці [9]. До теперішнього часу не проводили теоретичного оцінювання впливу δ зварних з'єднань на ефективність ЕДО, в тому числі і при обробці металу за різних

Лобанов Л.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О. – <http://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Тодорович Н.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-3872-5790>, Сидоренко Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-8780-9459>, Устименко П.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-5318-2675>
© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, Н.Л. Тодорович, Ю.М. Сидоренко, П.Р. Устименко, 2024

значень T , до яких нагрівається метал в процесі зварювання. Результати таких досліджень дозволяють визначити найбільшу граничну δ зварних з'єднань, в межах якої ЕДО є ефективним регулятором ЗНС при існуючих можливостях устаткування для ЕДО, тобто за умови $E_C \leq 1$ кДж, що відповідає кінетичній енергії електрода-ударника зі швидкістю до 5 м/с. Шляхом вирішення проблеми є математичне моделювання, для початку, динамічної (ударної) складової ЕДО для визначення впливу різної δ зварних з'єднань на ЗНС після їх ЕДО в процесі та після зварювання. Це має сприяти оптимізації технології ЕДО шляхом визначення граничних можливостей її застосування для ефективного керування ЗНС зварних з'єднань.

Метою роботи є розрахункова оцінка впливу товщини зварних з'єднань на їх ЗНС в результаті обробки ударною складовою ЕДО металу після та в процесі зварювання (при підвищених температурах).

Методика і розрахункова схема задачі. Об'єктом досліджень є процес чисельного розрахунку НДС модельних зварних з'єднань в результаті ударної обробки як складової ЕДО в умовах підвищених температур, який виконували в скінченно-елементній постановці за допомогою програми ANSYS/AUTODYN [10] у явному вигляді. Для побудови скінченно-елементної сітки (СЕС) задачі використовували тривимірний призматичний скінченний елемент SOLID164, а моделювання проводили із використанням рухомої СЕС, яка була жорстко зв'язана із середовищем та деформувалася разом з ним. Розрахункову схему та граничні умови задачі про процес ударної взаємодії електрода-індентора з пластиною, яку описано у роботі [8], наведено на рис. 1. Наявність геометричної симетрії електрода 1 і пластины 2, які динамічно взаємодіють, дозволяє розглядати у розрахунковій схемі лише їх четверту частину з обмеженням переміщення тіл на площинах симетрії.

В якості предмету дослідження використовували модель стикового зварного з'єднання зі сплаву АМг6 системи легування Al–Mg у вигляді попередньо напруженої пластины рівномірним одноосовим розтягом. Залишкові зварювальні напруження у площині пластины моделювали заданням значень поздовжньої компоненти σ_x (вздовж вісі x на рис. 1) напружень розтягу. Оскільки вплив ЕДО на напружений стан обробленої пластины є досить локальним за розміром, наприклад, до 10...15 мм, тому можна прийняти, що в зоні залишкових напружень розтягування при ЕДО ці напруження можна прийняти постійними. Застосована схема розрахунку є спрощеною, що не відтворює реальний розподіл залишкових напружень у зварному з'єднанні, але потребує мінімального часу розрахунку. По результатах порівняння σ_x в центрі шва (в зоні контактної взаємодії) після ЕДО за різних значень T можна вибрати температурний режим обробки, що забезпечує оптимальні залишкові напруження. Схема

розрахунку реальних розподілів напружень в поперечному перерізі зварного з'єднання із урахуванням активної зони – розтягу і реактивної – стиску буде реалізовано в подальших дослідженнях.

В математичній постановці поведінку матеріалів пластины (алюмінієвий сплав АМг6) та електрода-індентора (мідь М1) під дією зовнішнього імпульсного навантаження описували за допомогою ідеальної пружно-пластичної моделі матеріалу. Дана модель в бібліотеці матеріалів програми ANSYS/AUTODYN має назву «PLASTIC-KINEMATIC» [10]. Контактна взаємодія відбувалася без третя.

Розглядали взаємодію електрода-індентора із пластинами розмірами 300×200 мм і товщиною $\delta = 2, 4$ і 8 мм, які згідно прийнятій класифікації відносять до тонколистових конструкцій [11].

Вплив температури без врахування охолодження модельного зварного з'єднання описувався шляхом зміни таких механічних характеристик як модуль пружності E та межа плинності σ_T сплаву АМг6 при температурах $T = 150$ і 300 °С, де вибір значень T обґрунтовано у [8]. Моделювання виконували також для $T = 20$ °С з метою порівняння ефективності ЕДО після та в процесі зварювання. Значення компоненти σ_x залишкових зварювальних напружень відповідно приймали рівними σ_T сплаву АМг6 при $T = 20, 150$ і 300 °С. Механічні характеристики задіяних у моделюванні металевих матеріалів при $T = 20, 150$ і 300 °С наведено у табл. 1.

Задані значення T відповідають місцю розташування електрода-індентора вздовж лінії шва на відстані $L_{\text{ЕДО}}$ за джерелом зварювального нагріву (рис. 2).

За результатами попередніх експериментальних досліджень встановлено, що електрод-індентор отримував значення $V_0 = 5$ м/с (за умови $E_C = 1$ кДж), а його температура в процесі зварювання не перевищувала 20 °С [8]. Тому властивості електрода-індентора при його контактній взаємодії з пластиною задавали виключно для $T = 20$ °С (табл. 1).

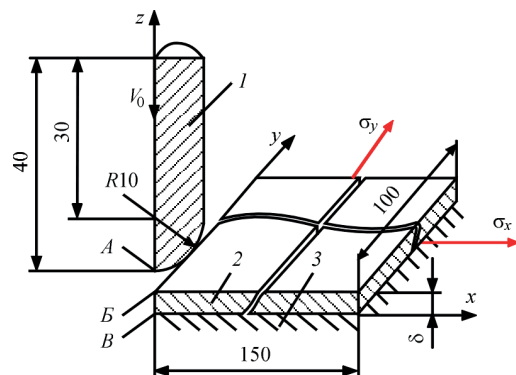


Рис. 1. Розрахункова схема процесу динамічного навантаження пластины при ЕДО: 1 – електрод-індентор; 2 – зразок, що обробляється; 3 – абсолютно жорстка основа; А – точка на зовнішній поверхні електрода-індентора; В – точка на зовнішній поверхні пластины; В – точка на зворотній поверхні пластины; V_0 – швидкість руху електрода-індентора [8]; x, y, z – вісі координат

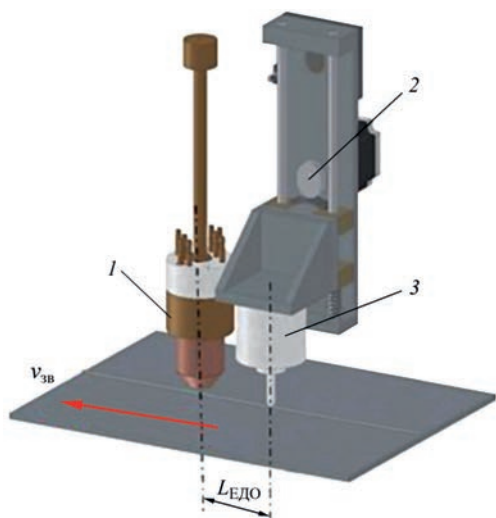


Рис. 2. Схема ЕДО у процесі зварювання, де $V_{зв}$ – напрямок зварювання; 1 – пальник для зварювання; 2 – система динамічного навантаження електроду ЕДО; 3 – електродний пристрій ЕДО; $L_{ЕДО}$ – відстань між вісями електродів для зварювання і ЕДО [8]

Результати моделювання та їх обговорення. Як відомо, компонента σ_x має значно більший вплив на ЗНС зварних з’єднань у порівнянні із σ_y [11]. В результаті моделювання отримані аксонометричні поверхні розподілу компоненти σ_x напружень (миттєві напруження) по товщині металу в момент завершення контактної взаємодії при $T = 20, 150$ і 300 °C електрода-індентора з пластиною $\delta = 2$ мм (рис. 3), $\delta = 4$ мм (рис. 4) та $\delta = 8$ мм (рис. 5) вздовж лінії удару (ЛУ) в точках Б і В (рис. 1), а також на вісі X на відстані 5 мм (рис. 3, а) від ЛУ для оцінки розподілу напружень вздовж центральної лінії шва.

Аналізуючи в цілому результати рис. 3–5, слід зазначити, що після ЕДО при $T = 150$ °C і 300 °C в пластинах формуються напруження, які дещо перевищують значення $\sigma_T = f(T^\circ\text{C})$ (табл. 1). Але результати моделювання дозволяють (у якісному відношенні) порівняти ЗНС пластин $\delta = 2 \dots 8$ мм після ЕДО за різних T і визначити оптимальне значення T , за якого досягається найбільша ефективність дії ЕДО на ЗНС зварних з’єднань. Можна бачити домінування миттєвих напружень σ_x стиску вздовж ЛУ в усьому розглянутому діапазоні δ і T . На відстані 5 мм від ЛУ дещо інша картина. Так, якщо для компонент σ_x в діапазоні $\delta = 2 \dots 4$ мм при усіх значеннях T домінують напруження стиску, то для $\delta = 8$ мм характерна зміна знаку напружень по товщині пластини від стиску у т. Б до розтягу у т. В.

Таблиця 1. Механічні характеристики структурних елементів моделі ЕДО сплаву АМгб в процесі зварювання

Номер	Структурний елемент моделі	Матеріал	Щільність ρ , кг/м ³	Коефіцієнт Пуассона μ	T , °C	Модуль пружності E , ГПа	Межа плинності σ_p , МПа	Відносн. подовж. δ , %
1	Пластина 300×200×2...8 мм	АМгб	2640	0,34	20	71	150	22
2					150	60	120	40
3					300	55	50	55
4	Електрод діаметром 15 мм	М1	8940	0,35	20	128	300	6

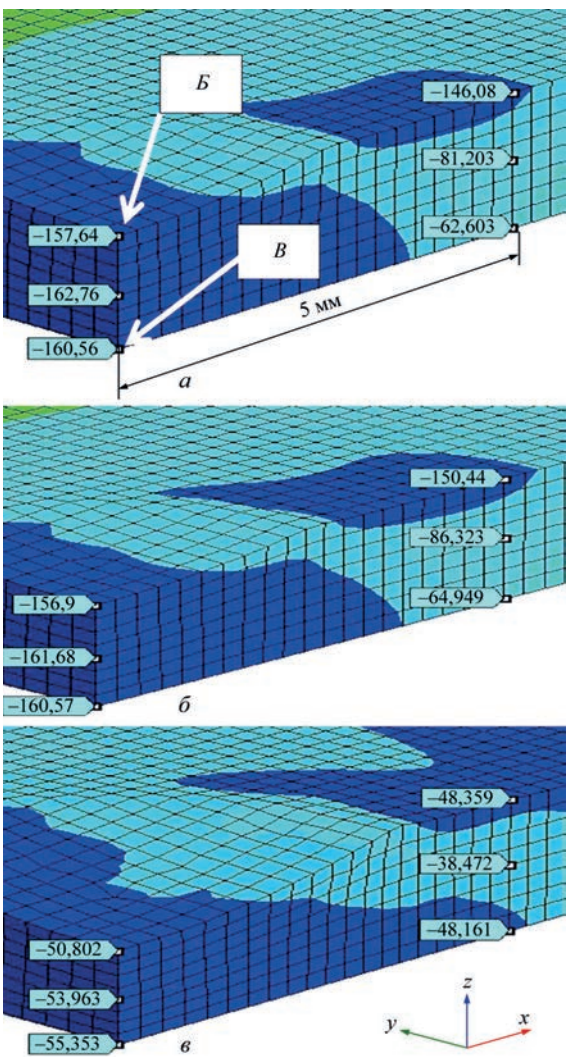


Рис. 3. Миттєві картини розподілу значень (МПа) компонент напружень σ_x у пластині зі сплаву АМгб $\delta = 2$ мм в момент завершення дії ЕДО по лінії удару (ЛУ) між точками Б і В (рис. 2) та на відстані 5 мм від лінії Б–В: а – σ_x при $T = 20$ °C; б – σ_x при $T = 150$ °C; в – σ_x при $T = 300$ °C

На рис. 3 наведено результати розрахунку миттєвих розподілів σ_x у пластинах $\delta = 2$ мм. Можна бачити, що вздовж ЛУ компоненти σ_x є виключно напруженнями стиску на контактній (т. Б) і зворотній (т. В) поверхнях пластин. Значення напружень вздовж ЛУ досягають $\sigma_T = f(T^\circ\text{C})$ для сплаву АМгб при $T = 20$ °C (рис. 3, а) і 300 °C (рис. 3, в) та зростають до $1,3\sigma_T$ при 150 °C (рис. 3, б). На відстані 5 мм від ЛУ значення σ_x стиску знижуються від σ_T на зовнішній поверхні до $0,4\sigma_T$ – на зворотній при $T = 20$ °C (рис. 3, а), від $1,25$ до $0,5\sigma_T$ – при $T = 150$ °C (рис. 3, б) та є близькими до σ_T при 300 °C на обох поверхнях (рис. 3, в).

Порівнюючи миттєві розподіли компоненти σ_x при $T = 20, 150$ і 300 °С, яка є домінуючою при формуванні залишкових зварювальних напружень, слід зазначити, що оптимальною температурою для ЕДО є 150 °С, за якої досягається максимальний рівень напружень стиску (миттєвих) в момент завершення контактної взаємодії.

На рис. 4 наведено результати розрахунку миттєвих розподілів σ_x у пластинах $\delta = 4$ мм. Можна бачити деякі відмінності у розподілах напружень від попередніх результатів ($\delta = 2$ мм), які пов'язані зі збільшенням товщини оброблених пластин. Так, вздовж ЛУ та на відстані 5 мм від неї значення σ_x стиску у загальному випадку менші, ніж при $\delta = 2$ мм.

Компоненти σ_x стиску вздовж ЛУ (від т. *Б* до т. *В*) досягають значень відповідно від $0,9\sigma_T$ до $0,7\sigma_T$ для сплаву АМг6 при $T = 20$ °С (рис. 4, *а*), $1,1\sigma_T$ при 150 °С (рис. 4, *б*, *з*), тобто менших, ніж для $\delta = 2$ мм. При $T = 300$ °С розподіли σ_x стиску близькі до σ_T (рис. 4, *д*, *е*), як і для пластин $\delta = 2$ мм. Навіть на зворотній поверхні значення σ_x стиску зростають до $1,2\sigma_T$. При співставленні значень напружень σ_x при $T = 20$ і 150 °С (рис. 4, *а*, *б*) можна бачити, що як і для пластин $\delta = 2$ мм, нагрів до 150 °С сприяє більшим миттєвим напруженням у порівнянні із ЕДО при $T = 20$ °С. Але подальше зростання температури контактної взаємодії до 300 °С не викликає помітних відмінностей миттєвого напруженого стану у порівнянні із отриманими при нижчих значеннях T .

Компонента σ_x стиску при $T = 20$ °С на відстані 5 мм від ЛУ досягає значень від $0,54\sigma_T$ на зовнішній до $0,27\sigma_T$ на зворотній поверхнях пластини (рис. 4, *а*). Напруження σ_x стиску на відстані 5 мм від ЛУ досягають значень від $0,79\sigma_T$ на зовнішній до $0,42\sigma_T$ на зворотній поверхнях сплаву АМг6 при $T = 150$ °С (рис. 4, *б*). Максимальних значень миттєвих напружень досягають при 300 °С. Так, компонента σ_x стиску на відстані 5 мм від ЛУ досягає значень від $1,4\sigma_T$ на зовнішній до $0,94\sigma_T$ на зворотній поверхнях сплаву АМг6 при $T = 300$ °С (рис. 4, *в*).

На рис. 5 наведено результати розрахунку миттєвих розподілів σ_x у пластинах $\delta = 8$ мм, які суттєво відрізняються від напружених станів пластин $\delta = 2$ і 4 мм. Можна бачити, що як по ЛУ, так і на відстані 5 мм від неї σ_x переходять від напружень стиску на зовнішній поверхні до розтягу на зворотній в усьому дослідженому діапазоні температур.

Так, при $T = 20$ °С значення σ_x по ЛУ змінюються від $0,48\sigma_T$ стиску на зовнішній поверхні до σ_T розтягу на протилежній, а на відстані 5 мм від ЛУ – від $0,46\sigma_T$ стиску на зовнішній до $0,6\sigma_T$ розтягу на протилежній (рис. 5, *а*). При $T = 150$ °С значення σ_x по ЛУ змінюються від $0,64\sigma_T$ стиску на зовнішній поверхні до $1,2\sigma_T$ розтягу на протилежній, а на відстані 5 мм від ЛУ – від $0,9\sigma_T$

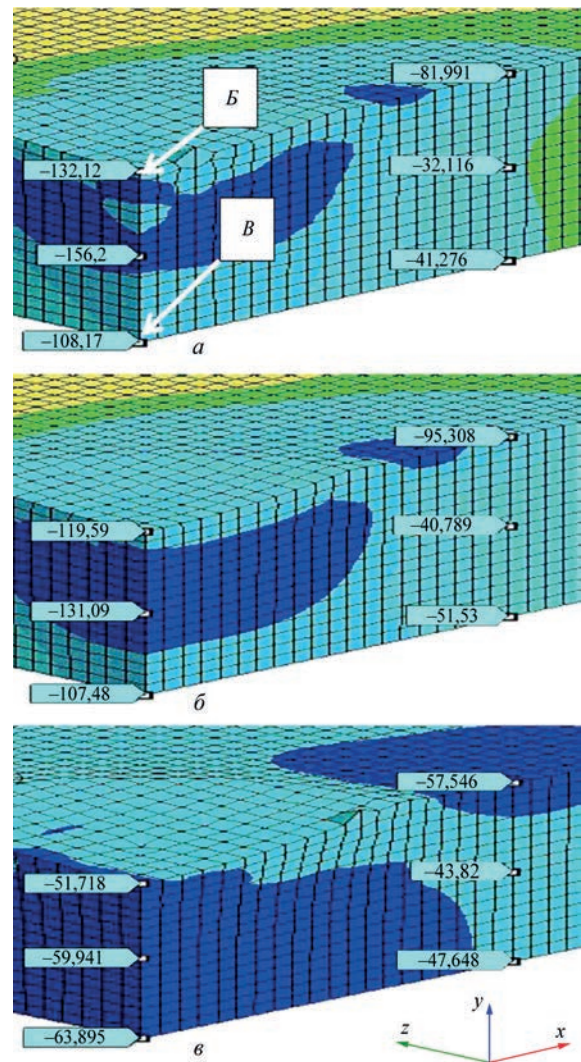


Рис. 4. Миттєві картини розрахункового розподілу значень (МПа) компонент напружень σ_x у пластині зі сплаву АМг6 $\delta = 4$ мм в момент завершення дії ЕДО по лінії удару (ЛУ) між точками *Б* і *В* та на відстані 5 мм від лінії *Б-В*: *а* – σ_x при $T = 20$ °С; *б* – σ_x при $T = 150$ °С; *в* – σ_x при $T = 300$ °С

стиску на зовнішній до $0,76\sigma_T$ розтягу на протилежній (рис. 5, *б*).

При збільшенні T до 300 °С метал при ЕДО зазнає інтенсивної пружно-пластичної течії, яку можна пояснити високотемпературним нагрівом значного об'єму (у порівнянні із $\delta = 2...4$ мм) металу в зоні контакту. Так, значення σ_x стиску на поверхні контакту (т. *Б*) та розтягу на зворотній поверхні (т. *В*) пластини вздовж ЛУ та на відстані 5 мм від ЛУ перевищують σ_T (рис. 5, *в*).

В табл. 2 представлено узагальнені результати моделювання ЗНС компоненти σ_x вздовж ЛУ та на відстані 5 мм від ЛУ для пластин $\delta = 2...8$ мм після ЕДО при різних T . Значення напружень надані у відносному вигляді стосовно $\sigma_T = f(T)$ (табл. 1), які відповідають значенню T , за якого проводили розрахунок контактної взаємодії. В рядках 1, 4 та 7 наведено значення компоненти σ_x ЗНС пластин відповідно $\delta = 2, 4$ та 8 мм після ЕДО при $T = 20$ °С. В рядках 2, 5 і 8 – залишкові σ_x для

$\delta = 2, 4$ і 8 мм після вистигання від $T = 150$ °С до 20 °С, а в $3, 6$ і 9 – аналогічно після вистигання від $T = 300$ до $T = 20$ °С.

При порівнянні між собою даних рядків $1, 4$ і 7 для $T = 20$ °С, рядків $2, 5$ і 8 для $T = 150$ °С та рядків $3, 6$ і 9 для 300 °С, можна бачити, що ЕДО пластин $\delta = 2...4$ мм при $T = 20...300$ °С вздовж

ЛУ сприяє формуванню σ_x стиску. Але вплив обробки суттєво зменшується при зростанні δ до 8 мм, що сприяє зменшенню пікових значень напружень стиску та переходу від стиску на контактній (в т. *Б*) до розтягу на зворотній в (т. *В*) поверхнях.

Для ділянки « 5 мм від ЛУ» дещо інша картина. Так, вже при зростанні δ від 2 до 4 мм значення σ_x стиску зменшуються майже вдвічі від зовнішньої поверхні – т. *Б* до зворотної – т. *В*. Таким чином, при зростанні δ знижується вплив ЕДО на метал зварного з'єднання біля лінії сплавлення. Збільшення δ до 8 мм визначає зменшення пікових напружень σ_x стиску у порівнянні із $\delta = 2...4$ мм та формуванням напружень розтягу на ділянках $\delta/2$ та на зворотній поверхні в т. *В*.

Узагальнюючи наведені дані, слід зазначити, що для $\delta = 2...4$ мм оптимальним значенням T застосування ЕДО є 150 °С, за якої сплав АМг6 ще суттєво не втрачає пружних властивостей (див. табл. 1).

Але для $\delta = 8$ мм дія T не має такого помітного впливу на ефективність ЕДО для корегування ЗНС (при заданому значенні V_0), як для $\delta = 2...4$ мм. При порівнянні рядків $7, 8$ і 9 можна бачити незначну відмінність значень σ_x , які отримано в результаті ЕДО при $T = 20...300$ °С для $\delta = 2...4$ мм.

Базуючись на результатах рис. 3–5 і табл. 2, слід зазначити, що при заданій вертикальній швидкості V_0 електрода-індентора (рис. 1) одностороння ЕДО сприяє формуванню ЗНС стиску на обох поверхнях зварних з'єднань пластин сплаву АМг6 $\delta = 2...4$ мм на відміну від $\delta = 8$ мм, де на зворотній поверхні формуються напруження розтягу. Таким чином, при $V_0 = 5$ м/с доцільно проводити двосторонню ЕДО пластин сплаву АМг6 $\delta = 8$ мм для отримання ЗНС стиску з обох боків зварних з'єднань.

Отримані результати можна пояснити тим фактом, що ЕДО при $T = 150$ °С ініціює формування більших за значенням відносних миттєвих σ_x у порівнянні із напруженнями при $T = 20$ °С. Це сприяє формуванню більш високих ЗНС стиску при вистиганні пластини у порівнянні із ЗНС після ЕДО при $T = 20$ °С. Наведені результати можна пояснити тим, що при $T = 150$ °С сплав АМг6 ще не

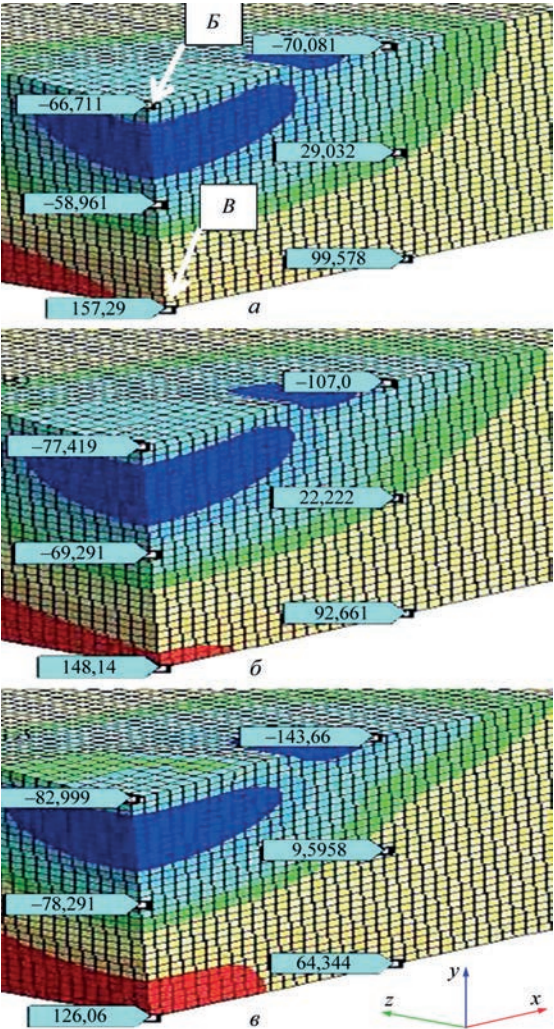


Рис. 5. Миттєві картини розрахункового розподілу значень (МПа) компонент напружень σ_x, σ_y у пластині зі сплаву АМг6 $\delta = 8$ мм в момент завершення дії ЕДО по лінії між точками *Б* і *В* (рис. 2) та на відстані 5 мм від лінії *Б–Б*: *а* – σ_x при $T = 20$ °С; *б* – σ_x при $T = 150$ °С; *в* – σ_x при $T = 300$ °С

Таблиця 2. Відносні* значення ЗНС компоненти σ_x в стикових з'єднаннях зі сплаву АМг6 $\delta = 2; 4$ та 8 мм після їх ЕДО в умовах нагріву до $T = 20, 150$ і 300 °С

Номер	$\delta, \text{мм}$	$T, ^\circ\text{C}$	Значення $\sigma_x \times \sigma_t$ в точках вздовж лінії <i>Б–В</i>			Значення $\sigma_x \times \sigma_t$ в точках на відстані 5 мм від лінії <i>Б–В</i>		
			Б	$\delta/2$	В	Б	$\delta/2$	В
1	2	ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}^*$	–1	–1	–1	–1	–0,5	–0,4
2		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–1,2	–1,26	–1,23	–1,16	–0,66	–0,5
3		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	–0,43	–0,45	–0,46	–0,4	–0,32	–0,4
4	4	ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}^*$	–0,88	–1,0	–0,72	–0,54	–0,2	–0,27
5		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–0,93	–1,0	–0,83	–0,73	–0,34	–0,43
6		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	–0,44	–0,5	–0,54	–0,49	–0,38	–0,41
7	8	ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}^*$	–0,48	–0,4	1	–0,46	0,2	0,6
8		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–0,59	–0,53	1,15	–0,83	0,17	0,72
9		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–0,7	–0,66	1,0	–1,2	0	0,5

Примітка. * – наведено значення ЗНС відносно $\sigma_t = f(T, ^\circ\text{C})$ у табл. 1.

втрачає пружних властивостей, а термічний вплив додатково стимулює механізми релаксації напружень, що підтверджують дані [7]. Але при ЕДО за температури $T = 300^\circ\text{C}$ миттєві напруження, значення яких є нижчими, ніж при $T = 150^\circ\text{C}$, відповідно сприяють формуванню менших ЗНС стиску (у порівнянні із ЗНС після ЕДО при $T = 150^\circ\text{C}$).

Наведені результати розрахунків показали, що ЕДО металу зварного з'єднання $\delta = 2 \dots 8$ мм зі сплаву АМг6, яку виконували при $T = 150^\circ\text{C}$ (що моделює обробку в єдиному процесі синхронно із зварюванням плавленням), є більш ефективною у порівнянні із ЕДО при $T = 300^\circ\text{C}$ або із роздільною ЕДО після зварювання (що відповідає ЕДО при $T = 20^\circ\text{C}$). Ефективність ЕДО визначається формуванням більших за значеннями ЗНС стиску отриманого зварного з'єднання. При тому для формування ЗНС стиску по товщині зварних з'єднань $\delta = 2 \dots 4$ мм достатньо провести односторонню ЕДО (при заданому значенні V_0), а для $\delta = 8$ мм – двосторонню.

Висновки

1. На базі розробленої математичної моделі динамічної взаємодії електрода-індентора із стиковим зварним з'єднанням зі сплаву АМг6 $\delta = 2 \dots 8$ мм проведено чисельну розрахункову оцінку впливу δ на кінетику напружень і ЗНС пластин в результаті електродинамічної обробки (ЕДО) при підвищених температурах.

2. За результатами розрахунків доведено, що застосування ЕДО металу шва сплаву АМг6 $\delta = 2 \dots 8$ мм, яка виконується при $T = 150^\circ\text{C}$ (умова моделювання ЕДО в єдиному процесі синхронно із зварюванням плавленням) сприяє формуванню більших за значеннями ЗНС стиску у порівнянні

із ЕДО при $T = 300^\circ\text{C}$ або роздільною ЕДО після зварювання при $T = 20^\circ\text{C}$.

3. При тому для формування ЗНС стиску по товщині зварних з'єднань $\delta = 2 \dots 4$ мм достатньо провести односторонню ЕДО (при заданому значенні швидкості V_0 контакту), а для $\delta = 8$ мм – двосторонню.

Список літератури/References

1. Madi, Y., Besson, J. (2014) *Effect of residual stresses on brittle fracture*. Mat. ECRS-9. UTT, Troyes, France.
2. (2022) Welding and technical diagnostics for the recovery of the economy of Ukraine: *Abstracts of reports science conf.* Kyiv: International Association «Welding».
3. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L., Sidorenko, Y.M. (2018) Electric Pulse Component Effect on the Stress State of AMg6 Aluminum Alloy Welded Joints Under Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*, 50(2), 246–253. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>
4. Sydorenko, Y.M., Pashchin, M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2020) Effect of Pulse Current on Residual Stresses in AMg6 Aluminum Alloy in Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*, 52(5), 731–737. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00226-2>
5. Conrad, H., Sprechler, A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Elsevier Science Publishers B.V., Dislocations in Solids Ed. by F.R.N. Nabarro, 500–529.
6. Shao, Quan, Kang, Jiajie, Xing, Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr2Ni4A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 218–224.
7. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. (2004) High-Density Pulse Current-Induced Unsteady Stress-Strain State in a Long Rod. *Strength of Materials* 36, 377–381. <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34>
8. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2022) Stress-Strain State of Welded Joints of AMg6 Alloy after Electrodynamic Treatment During Welding. *Strength of Materials*, 54, 6, 983–996. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>
9. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of welded joints of AMg6 alloy of different thickness. *The Paton Welding J.*, 3, 6–10.
10. <http://www.ansys.com/>.
11. Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom.

COMPUTATIONAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE THICKNESS OF WELDED JOINTS OF AMg6 ALLOY ON THEIR STRESS-STRAIN STATE AFTER ELECTRODYNAMIC TREATMENT IN THE PROCESS OF WELDING

Lobanov L.M.¹, Pashchin M.O.¹, Mikhodui O.L.¹, Todorovych N.L.¹, Sydorenko Yu.M.², Ustylenko P.R.²

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

E-mail: svarka2000@ukr.net

²NTUU «Kyiv Igor Sikorsky Polytechnic Institute. 37 Beresteisky Ave., 03056, Kyiv.

A calculated evaluation of the efficiency of electrodynamic treatment (EDT) effect on the stress state of butt-welded joints of plates made of aluminium AMg6 alloy with an increase in their thickness δ was carried out. Mathematical modelling of the kinetics and residual stress states of butt-welded joints $\delta = 2, 4$ and 8 mm as a result of their EDT at different values of the temperature T of the plates, at which the treatment was carried out was performed. The value of the vertical velocity V_0 of the indenter electrode (EDT tool) was taken as $V_0 = 5$ m/s, which corresponds to the modern electrophysical characteristics of the equipment for EDT. The T value was set, reflecting the conditions of EDT after welding ($T = 20^\circ\text{C}$) and during fusion welding ($T = 150$ and 300°C). The problem was solved in a three-dimensional formulation using the ANSYS program. The conditions for the formation of stresses in the plates at EDT after and during welding were determined by the mechanical characteristics of the AMg6 alloy at temperatures $T = 20, 150$, and 300°C without taking cooling into account. The results of the calculation of kinetics and residual stresses in welded joints are presented. It is shown that for a value of $T = 150^\circ\text{C}$, EDT provides the most optimal residual stress states of the plates in the entire experimental range δ . It was proven that EDT in the welding process (at $T = 150^\circ\text{C}$) is more efficient compared to EDT of metal after cooling ($T = 20^\circ\text{C}$). It was established that at EDT of welded joints $\delta = 2 - 4$ mm, residual compressive stresses are formed over the entire thickness of the plates, the values of which are close to the yield strength of the AMg6 alloy. At EDT of welded joints $\delta = 8$ mm, residual compressive stresses are formed on the outer surface of the plates, and on the back side – tensile ones. 11 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Key words: electrodynamic treatment, residual welding stresses, aluminium alloy, electric current pulse, shock interaction, finite-element model, electrode-indenter, theory of elastic-plastic flow, fusion welding

Надійшла до редакції 13.11.2023

Отримано у переглянутому вигляді 19.02.2024

Прийнято 07.03.2024

СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІМЕТАЛУ
ТИТАНОВИЙ СПЛАВ GRADE 12 – ВУГЛЕЦЕВА СТАЛЬ 16 Mn,
ОТРИМАНОГО ЗВАРЮВАННЯМ ВИБУХОМ

П.С. Шльонський, Фенг Гао

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

На якість біметалу, отриманого зварюванням вибухом, впливають механічні характеристики матеріалу, який метається. Для розробки режимів зварювання вибухом було проведено дослідження структури і механічних властивостей біметалу титановий сплав Grade 12 (TA10, пластина, яка метається) + вуглецева сталь 16 Mn (09Г2С). Товщина пластин із титанового сплаву складала 5 і 6 мм, механічні властивості, а саме відносне подовження, у стані поставки для цих пластин відрізнялись на 15 %. Приведено результати міцності на відрив та зріз шарів біметалу титановий сплав–вуглецева сталь. На прикладі титанового сплаву TA10 показано, що для пластин з нижчим відносним подовженням міцність з’єднання, отриманого зварюванням вибухом, нижча. Випробування на згин показало відсутність розшарування у двох товщин титанового сплаву. Також для двох товщин титанового сплаву зона з’єднання має характерну для зварювання вибухом мікроструктуру. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: зварювання вибухом, біметал титан-сталь, механічні властивості

Вступ. Різні галузі сучасного машинобудування відчувають гостру потребу у біметалі титан–сталь. При отриманні цього біметалу виникають труднощі, перш за все пов’язані зі специфічними властивостями титану, а саме утворенням крихких інтерметалідів у зоні з’єднання.

Одним із способів, який дозволяє отримувати біметал титан–сталь, є зварювання вибухом завдяки малій тривалості процесу формування з’єднання і відсутності нагріву [1–3]. Однак, завдання отримання зварюванням вибухом якісного біметалу титану зі сталлю в повній мірі не вирішено, так як існує дуже вузький діапазон отримання міцного з’єднання, а також в зоні з’єднання утворюються крихкі інтерметаліди.

На прикладі [4, 5] спостерігаємо, що в даний час дослідження по отриманню біметалевих плит зварюванням вибухом у Китайській народній республіці та світі зосереджені, переважно, на чистому титані. Слід зауважити, що міцність чистого титану зменшується з підвищенням температури, а при досягненні 250 °С вона знижується удвічі. Тому для обладнання, яке працює при підвищених температурах, необхідно використовувати титанові сплави. Так, у [6] приведено дослідження властивостей біметалу титановий сплав TA10 та вуглецева сталі Q345.

Матеріали і методики досліджень. Титан TA10 представляє собою низьколегований титановий сплав системи Ti–Mo–Ni, який містить 0,3 % Mo і 0,8 % Ni (табл. 1), що не тільки покращує його механічні властивості при високих температурах, але також має гарну корозійну стій-

кість до хлоридів з низьким рН або слабовідновлювальних кислот і його корозійна стійкість значно краще, ніж у чистого титану [7].

У якості пластини, яка метається, використовували титановий сплав TA10 завтовшки 5 і 6 мм. Механічні властивості матеріалу пластин різних товщин представлені у табл. 2 і 3. Відносне подовження у стані поставки відрізнялося для пластин різної товщини на 15 %. Розмір пластин складав 450×300 мм.

Метою даної роботи було дослідження впливу відносного подовження титанового сплаву TA10 на механічні властивості і мікроструктуру з’єднання біметалу TA10 + 09Г2С, отриманого зварюванням вибухом.

При відпрацюванні режиму зварювання вибухом титанового сплаву TA10 зі сталлю 09Г2С були проведені експерименти на масштабних зразках.

У якості основи використовували пластину з вуглецевої сталі 09Г2С, завтовшки 80 мм.

Висота вибухової речовини складала 50 і 45 мм відповідно для пластини з титанового сплаву 6 і 5 мм. Швидкість детонації вимірювали з допомогою дровових датчиків, вона становила 2100 і 2040 м·с⁻¹ відповідно для пластин завтовшки 6 і 5 мм. Зовнішній вигляд пластин перед (а) зварюванням вибухом та після (б) нього показано на рис. 1.

Після зварювання вибухом виконували термічну обробку для зняття внутрішніх напружень

Таблиця 1. Хімічний склад TA10 по GB/T 3620.1-2007 (стандарт КНР)

Ti, решта, %	Домішки, не більше, %						
	Mo	Ni	Fe	C	N	H	O
	0,2...0,4	0,6...0,9	0,30	0,08	0,03	0,015	0,25

Таблиця 2. Механічні властивості листа титанового сплаву TA10, завтовшки 6 мм

Стан матеріалу	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %
М	275	345	30

Таблиця 3. Механічні властивості листа титанового сплаву TA10, завтовшки 5 мм

Стан матеріалу	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %
М	227	362	26

за температури не вище 540 °С і перевірку якості з’єднання шляхом ультразвукової дефектоскопії. Зразки для проведення механічних випробувань вирізали по схемі, яка представлена на рис. 2.

Швидкість співударяння пластин розраховували по формулі де: D – швидкість детонації; r – коефіцієнт навантаження, відношення маси вибухової речовини до маси пластини, яка метається [1].

Густина вибухової речовини складає 1 гр·см⁻³.

$$Vc = D \frac{(\sqrt{1 + \frac{32}{27}r} - 1)}{(\sqrt{1 + \frac{32}{27}r} + 1)}$$

Виконавши нескладний розрахунок отримаємо, що швидкість співударяння буде становити 592 і 598 м·с⁻¹ відповідно для пластин завтовшки

6 і 5 мм. Отже енергії пластин при співударянні будуть близькими за значенням, навіть енергія, пластини завтовшки 5 мм, буде нижчою.

Дослідження мікроструктури виконували за допомогою металографічного мікроскопу MS600. Мікроструктура з’єднання титановий сплав TA10 + 09Г2С показана на рис. 3.

Результати експериментів та їх обговорення. Як видно з рис. 3, зона з’єднання має характерну для зварювання вибухом хвилюву границю. Форма хвиль, їх амплітуда та частота майже однакові для різних товщин плакування. При цьому на границі з’єднання TA10 + 09Г2С з товщиною плакування 5 мм (рис 3, б) спостерігаються інтерметаліди у вигляді дисперсних включень на ділянках на зворотній частині хвилі. Це повністю корелюється з результатами роботи [8], в якій проведено дослідження особливостей фазоутворення при зварюванні тиском.

Оцінку механічних властивостей отриманого зварювання вибухом біметалу TA10 + 09Г2С виконували шляхом випробувань на відрив плакування, на зріз і на загин.

Випробування на відрив проводили шляхом відриву по кільцевому контуру. Зразок для випробувань вставляють в опору трубчастої форми, а зверху у глухий отвір зразка вставляють пуансон



Рис. 1. Зовнішній вигляд пластин з титанового сплаву Grade12 і вуглецевої сталі 09Г2 перед зварюванням вибухом (а) і після нього (б)

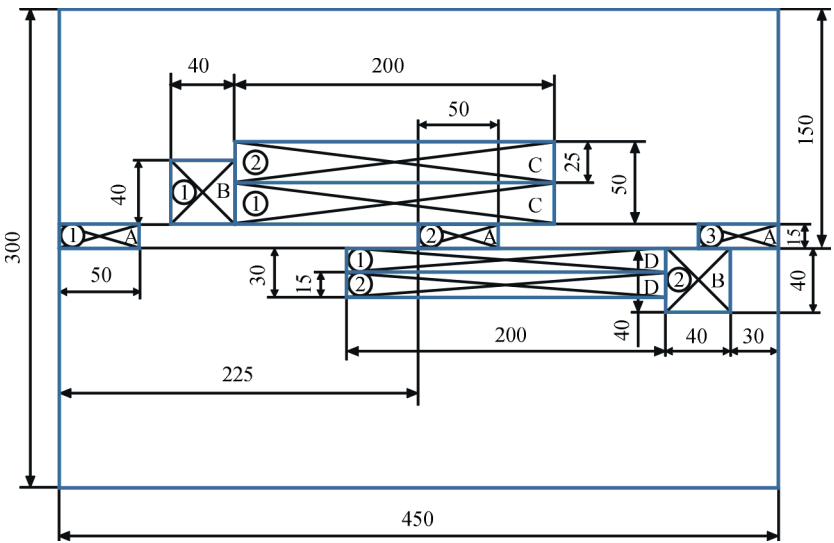


Рис. 2. Схема вирізки зразків для проведення механічних випробувань: 1А, 2А, 3А – зразки для дослідження мікроструктури; 1В, 2В – зразки для дослідження міцності на відрив плакування; 1С, 2С – зразки для дослідження міцності на зріз плакування; 1D, 2D – зразки для дослідження міцності на загин

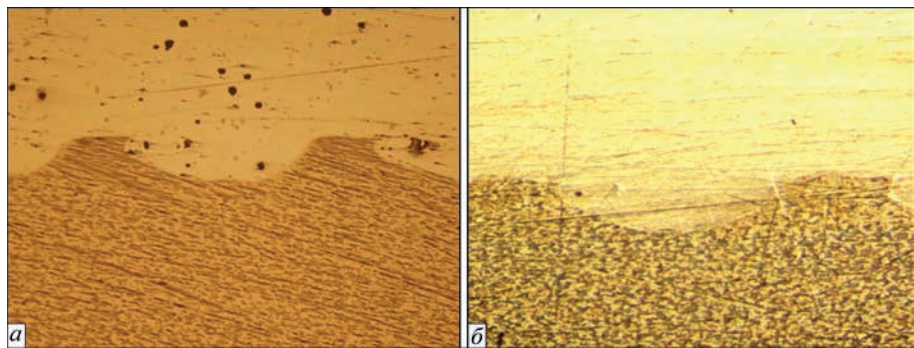


Рис. 3 Мікроструктура зони з’єднання титан ТА10 (зверху) + сталь 09Г2С (знизу), товщина плакування 6 мм (а) (×100) і 5 мм (б) (×200)

на який прикладають тиск від розривної машини (рис. 4, а).

Міцність з’єднання біметалу ТА10 + 09Г2С на відрив визначали шляхом поділу зусилля що прикладене, щоб відірвати плакування, на площу кільця. З рис. 4, б видно, що розрив стався по зоні з’єднання, що є характерним для біметалу титановий сплав – вуглецева сталь, а границя з’єднання має чітко виражений хвилювий характер.

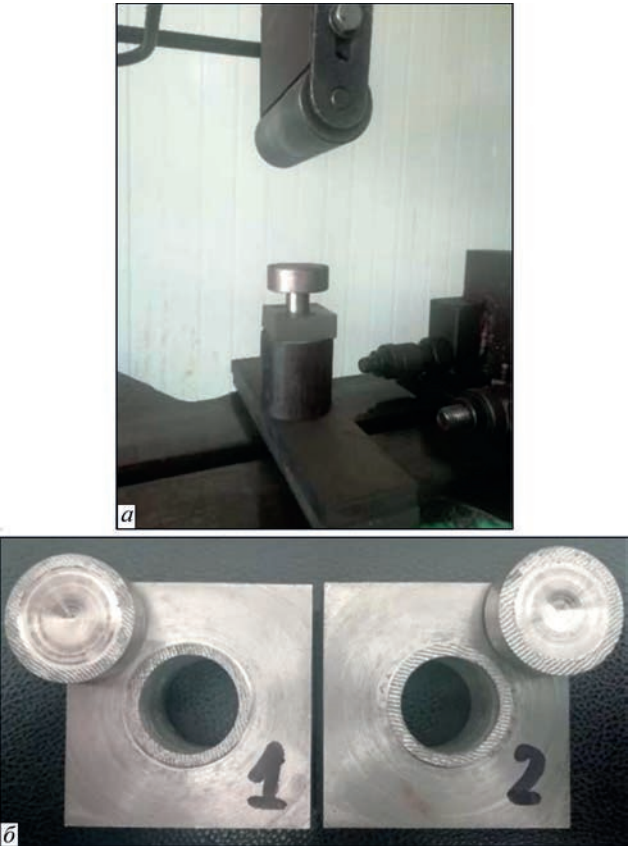


Рис. 4. Вигляд випробувань на відрив плакування (а) і зразків після випробувань для плакування завтовшки 6 мм (б)

Результати випробування на відрив та зріз показано у табл. 4. Як видно з результатів табл. 4, міцність на відрив для титанового сплаву з меншим відносним подовженням менша на 73 і 112 % для зразків з ділянок 1 і 2 відповідно. В середньому міцність на відрив знижується на 92,5 %.

Випробування міцності біметалу на зріз проводилося шляхом розтягування плоских зразків з поперечними надрізами шарів (рис. 5). Результати випробувань міцності на зріз повністю корелюються з результатами міцності на відрив.

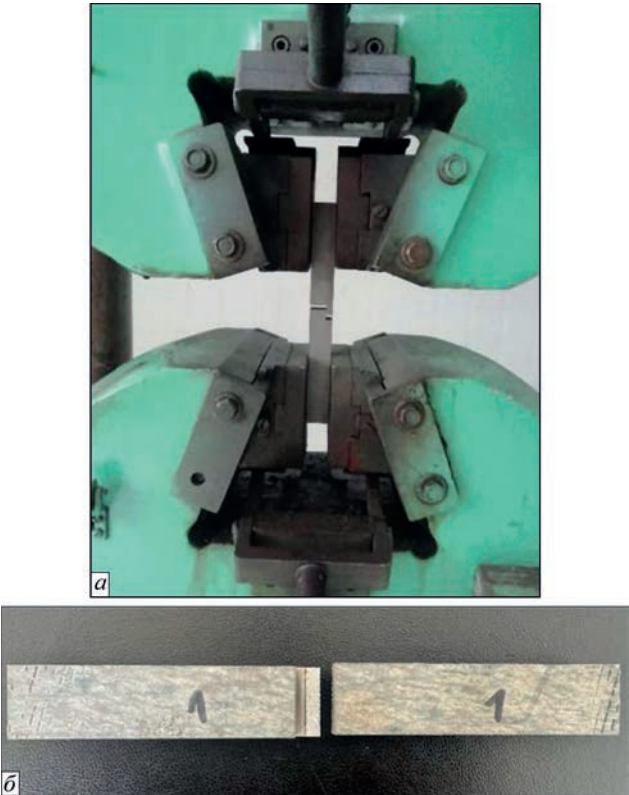


Рис. 5. Вигляд випробувань міцності на зріз (а) і зразка після випробувань (б)

Таблиця 4. Результати випробувань на відрив плакування та зріз для біметалу ТА10 + 09Г2С отриманого зварюванням вибухом

Товщина плакування/номер зразка	Міцність на відрив, МПа	Міцність на зріз, МПа
5 мм/№ 1	289,1	163,2
5 мм/№ 2	167,1	146,9
6 мм/№ 1	502,4	354,4
6 мм/№ 2	354,8	247

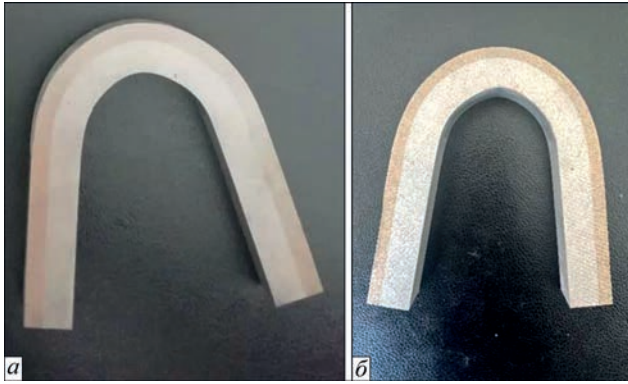


Рис. 6. Випробування біметалу TA10 + 09Г2С на згин, товщина плакування 6 мм (а), товщина плакування 5 мм (б)



Рис. 7. Вигляд біметалевої трубної дошки TA10-09Г2С діаметром 3340 мм після термічної обробки

Як видно з табл. 4, міцність на зріз для титанового сплаву з меншим відносним подовження менша на 117 і 68 % для зразків з ділянок 1 і 2 відповідно. Міцність на зріз на початку зразку вища ніж у кінці для обох товщин. В середньому міцність на зріз знижується на 92,5 %. Розбіжність результатів механічних випробувань на ділянках 1 і 2 можна пояснити дисперсністю формування інтерметалідів.

При дослідженні механічних властивостей біметалу, отриманого зварюванням вибухом, досить показовим є випробування на згин, оскільки, у разі неякісного зварювання відбувається розшарування по зоні з'єднання. Зразки для обох товщин плакування 6 і 5 мм (рис. 6) витримали загин на 180° без відшарування. Це свідчить про високу якість зварювання.

Ультразвукове дослідження суцільності з'єднання показало відсутність розшарувань по усій площині біметалевої пластини.

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY GRADE 12 – CARBON STEEL 16 Mn BIMETAL OBTAINED BY EXPLOSION WELDING

P.S. Shlonskyi, Feng Gao

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

The quality of the bimetal produced by explosion welding is affected by the mechanical characteristics of flying plate material. For development of explosion welding modes, a study of the structure and mechanical properties of titanium alloy Grade 12 (TA10, flying plate) + carbon steel 16 Mn (09G2S) bimetal was conducted. The thickness of the titanium alloy plates was 5 and 6 mm, the mechanical properties, namely the relative elongation in as-delivered condition for these plates differed by 15 %. The results on tear and shear strength of titanium alloy-carbon steel bimetal are given. In the case of titanium alloy TA10 it is demonstrated that for plates with a lower relative elongation, the strength of the joint produced by explosion welding is lower. Bending test showed no delamination for two thicknesses of the titanium alloy. Also, for the two thicknesses of the titanium alloy, the joint zone has a microstructure characteristic for explosion welding. 8 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

Key words: explosion welding, titanium-steel bimetal, mechanical properties

Після проведених досліджень були надані рекомендації для отримання за допомогою зварювання вибухом біметалевих трубних дошок діаметром 3340 мм для теплообмінних апаратів (рис. 7).

Висновки

1. Встановлено, що зниження відносного подовження на 15 % для титанового сплаву TA10 призводить до зниження міцності на відрив та зріз в середньому на 92,5 % при близьких значеннях енергії зварювання вибухом.

2. У результаті проведеної роботи були надані рекомендації для коригування режиму зварювання вибухом титанового сплаву TA10 з вуглецевою сталлю 09Г2С з товщиною плакування 5 мм для підвищення якості з'єднання.

Список літератури/References

1. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. (1978) *Сварка взрывом в металлургии*. Москва, Металлургия. Kudinov V.M., Koroteev A.Ya. (1978) *Explosion welding in metallurgy*. Moscow, Metallurgy. [in Russian].
2. Лысак В.И., Кузьмин С.В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение. Lysak V.I., Kuz'min S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mechanical engineering. [in Russian].
3. Дерibas А.А. (1980) *Физика упрочнения и сварки взрывом*. Новосибирск, Наука. Deribas A.A. *Physics of hardening and explosionwelding* (1980) Novosibirsk. Science. [in Russian].
4. Zheng Yuanmou (2002) *Explosive Welding and Metal Cladded Materials as well as the Engineering Applications*, Central South University Press, Changsha.
5. Wang Yaohua (2007) *Researches and Practices on Explosive Welding of Metal Sheets*, National Defense Industry Press, Beijing.
6. HAN Xiao-min, WANG Shao-gang, HUANG Yan et al. (2015) Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of TA10-Q345R Composite Plate with Explosive Welding. Doi: 10.3969/j.issn. 1001-4837. 2015.06.004 *Titanium academics J., Nanjing*, 6, 32, 24-29.
7. Findik, F. (2011) Recent developments in explosive welding. *Materials and Design*, 32 (3), 1081-1093.
8. Маркашова Л.И., Арсенюк В.В., Григоренко Г.М. (2002) Особенности фазообразования при сварке давлением разнородных металлов в условиях высокоскоростного деформирования. *Автоматическая сварка*, 9, 12-17. L.I. Markashova, V.V. Arsenyuk, G.M. Grigorenko (2002) Features of phase formation during pressure welding of dissimilar metals under high-speed deformation conditions. *Automatic welding*, 9, 12-17. [in Russian].

Надійшла до редакції 26.01.2024
Отримано у переглянутому вигляді 15.03.2024
Прийнято 25.03.2024

ДЕТОНАЦІЙНІ ПОКРИТТЯ, ОТРИМАНІ НАПИЛЕННЯМ ЛЕГОВАНИХ ПОРОШКІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ Fe–Al

Н.В. Вігілянська, Т.В. Цимбаліста, А.І. Кільдій, К.В. Янцевич, З.Г. Іпатова, М.А. Васильківська

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

Наведено результати дослідження структури, фазового складу та властивостей детонаційних покриттів, які було отримано напиленням механічної суміші порошків Fe та сплавів AlMg та TiAl, а також композиційних порошків того ж складу, які було отримано методом механохімічного синтезу. Встановлено, що у покриттях, які було отримано з механічних сумішей порошків, синтезу інтерметалідів не відбувається і покриття складаються з вихідних компонентів та їх оксидів. Тому в якості матеріалів для напилення доцільно використовувати порошки, які було отримано методом механохімічного синтезу, внаслідок чого формуються покриття, основною фазою в яких є інтерметалід Fe–Al. Покриття систем Fe–AlMg і Fe–TiAl, які було отримано напиленням композиційних порошків, характеризуються щільною ламелярною структурою, що складається з шарів металевих і оксидних складових, які чергуються. Покриття мають високу жаростійкість в температурному діапазоні 700...800 °С, порівнянну з жаростійкістю литих сплавів системи залізо-алюміній і дозволяють підвищити жаростійкість вуглецевих сталей в 6...20 разів. Корозійна тривкість детонаційних покриттів Fe–AlMg і Fe–TiAl в 3%-му розчині NaCl перевищує корозійну тривкість вуглецевої сталі без покриття в 13,3 і 28,0 разів, відповідно. Отримані результати дозволяють рекомендувати розроблені покриття для захисту деталей, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ при температурі до 800 °С. Бібліогр. 19, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: інтерметаліди системи Fe–Al, механохімічний синтез, композиційні порошки, детонаційне напилення, покриття, жаростійкість, корозійна тривкість

Вступ. Інтерметалідні сплави на основі алюмініду заліза Fe–Al є перспективними матеріалами, які розглядаються в якості заміників жароміцних сталей та сплавів завдяки комплексу їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, а також низькій вартості їх вихідних компонентів [1–3]. Зокрема, інтерметалідні сплави на основі алюмініду заліза є привабливими матеріалами для ряду промислових використань як в якості литих матеріалів, так і в якості захисних покриттів при середніх і високих температурах через їх високі механічні властивості, відносно низьку щільність, стійкість до високотемпературного окислення та відмінну корозійну тривкість в окислювальних та сульфідуючих середовищах [4–6]. Недоліками інтерметалідних сплавів системи Fe–Al, що обмежують їх широке практичне застосування, є їхня низька пластичність при кімнатній температурі, недостатня міцність і опір повзучості при температурі вище 600 °С. Підвищення пластичності та характеристик міцності інтерметалідів Fe–Al досягається шляхом введення до їх складу легуючих елементів за рахунок утворення в структурі сплаву карбідів і боридів, твердих розчинів, потрійних інтерметалідних сполук [7–10].

Для нанесення покриттів на основі інтерметалідів системи Fe–Al з легуючими елементами переважно застосовуються методи плазмового, високошвидкісного напилення. Вігілянська Н.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-2095>, Цимбаліста Т.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9569-7776>, Кільдій А.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8133-8705>, Янцевич К.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3975-7727>, Іпатова З.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-2209-408X>, Васильківська М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-8311-6428>
© Н.В. Вігілянська, Т.В. Цимбаліста, А.І. Кільдій, К.В. Янцевич, З.Г. Іпатова, М.А. Васильківська, 2024

ного газополуменевого (HVOF) та детонаційного напилення [11]. В якості матеріалів для напилення використовуються порошки, отримані розпиленням та механічним легуванням; в якості легуючих елементів застосовують Cr, B, Zr. Одержані покриття на основі інтерметаліду Fe–Al характеризуються високою корозійною тривкістю в різних агресивних середовищах, зносостійкістю, стійкістю до термоудару та високотемпературного окислення (аж до 1000 °С); твердість покриттів становить 3...5 ГПа [11, 12].

Метою цієї роботи було дослідження структури, фазового складу та властивостей покриттів, які було отримано детонаційним напиленням порошків на основі інтерметалідів Fe–Al, легуваних Mg та Ti.

Матеріали та методики досліджень. Для детонаційного напилення використовували композиційні порошки (КП) складів $86\text{Fe} + 14(\text{Al}5\text{Mg})$ і $60,8\text{Fe} + 39,2 (62,5\text{Ti}37,5\text{Al})$ (мас. %), які було отримано методом механохімічного синтезу (МХС) шляхом обробки суміші порошків у планетарному млині, та механічні суміші того ж складу (табл. 1). В якості вихідних порошків для отримання механічних сумішей і КП використовували порошок заліза та сплавів AlMg-5 і T65Ю35. Склади порошкових сумішей були розраховані на отримання інтерметаліду Fe_3Al . При використанні в якості легуючих елементів Ti та Mg підвищення властивостей покриттів на основі інтерметаліду Fe–Al

може бути здійснено за рахунок формування твердих розчинів та некогерентних сполук.

Напилення покриттів проводили на установці детонаційного напилення «Перун-С» з використанням раніше вибраного режиму напилення покриттів на основі інтерметаліду Fe_3Al , при якому частинки КП нагріваються до $0,8 \dots 0,9 T_{\text{пл}}$ та прискорюються до максимальної швидкості руху [14]. В якості параметрів роботи установки були використані: витрата пального газу (пропан-бутан) – $0,5 \text{ м}^3/\text{год}$, витрата кисню – $1,3 \text{ м}^3/\text{год}$, витрата газу-розріджувача (повітря) – $0,6 \text{ м}^3/\text{год}$, витрата транспортуючого газу (повітря) – $0,4 \text{ м}^3/\text{год}$, частота пострілів – $400/\text{хв}$, завантаження порошку – $120 \text{ мг}/\text{постріл}$, дистанція напилення – 110 мм . Для напилення використовували порошки розміром частинок $40 \dots 80 \text{ мкм}$.

Для дослідження структури покриттів застосовували метод металографії (мікроскоп «Неофот-32» з приставкою для цифрової зйомки), фазового складу – рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) на дифрактометрі ДРОН-3 в $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні з графітовим монохроматором при кроковому переміщенні $0,1^\circ$ та часу експозиції в кожній точці 4 сек з наступною комп'ютерною обробкою цифрових даних. Ідентифікацію фаз здійснювали за допомогою бази даних ASTM.

Таблиця 1. Характеристика порошків для напилення [13]

Склад, мас. %	Метод отримання	Фазовий склад
86Fe + 14(Al5Mg)	Механічне змішування	Fe, тв. р-н Mg в Al
	MXC	Тв. р-н Mg в Fe_3Al
60,8Fe + 39,2(62,5Ti37,5Al)	Механічне змішування	Fe, TiAl
	MXC	Тв. р-н Al в FeTi ($\text{Fe}_{1-x}\text{TiAl}_x$)

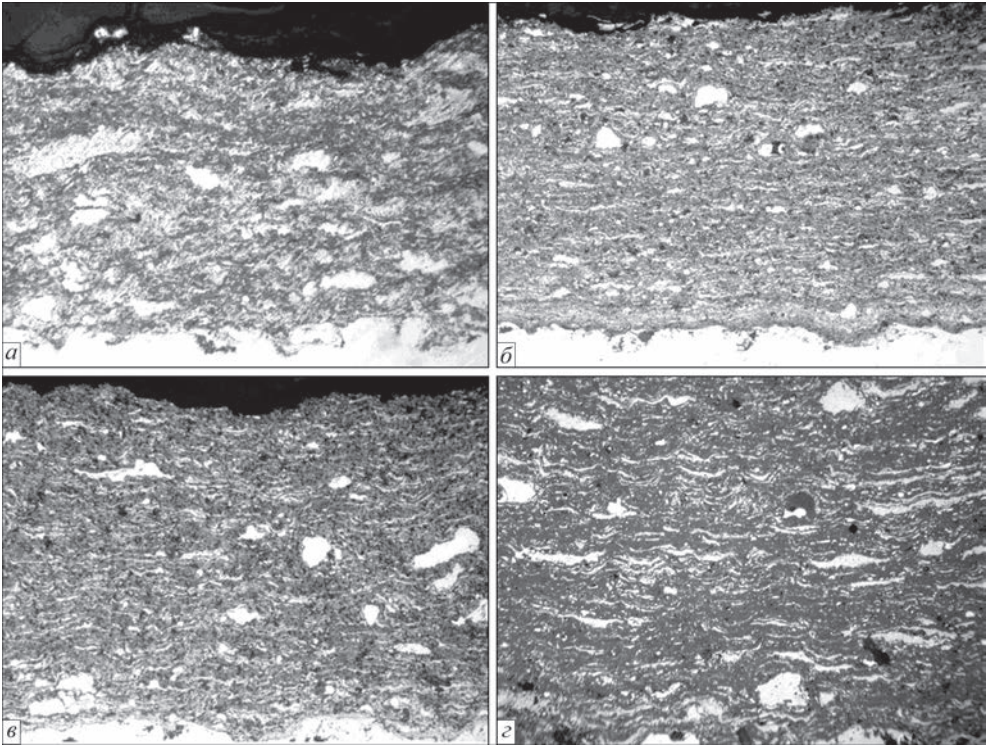


Рис. 1. Мікроструктура ($\times 400$) детонаційних покриттів, які було отримано напиленням порошків систем Fe–AlMg (а, б) і Fe–TiAl (в, г) з використанням механічних сумішей (а, в) і MXC-порошків (б, г)

казник корозії покриттів (K_p) та коефіцієнт гальмування корозійного процесу (γ) [15, 16].

Результати досліджень та їх обговорення. Покриття систем Fe–AlMg і Fe–TiAl, які було отримано напиленням механічних сумішей порошків, мають крупноламельну структуру, що складається з шарів світлих і темних ламелей оксидів, які чергуються, з наявністю в структурі оплавлених частково деформованих частинок порошку (рис. 1, а, в). У випадку використання для напилення МХС-порошків формуються покриття з більш однорідною тонколамельною структурою з незначною кількістю неповністю деформованих частинок (рис. 1, б, г). При цьому в покриттях системи Fe–TiAl відзначається менша кількість нерозплавлених частинок, що може бути пов'язано з фазовим складом порошків, що напилюються, від якого залежить ступінь проплавлення частинок в процесі напилення та ступінь деформації їх при формуванні шару покриття.

Дослідження фазового складу покриттів, які було отримано при напиленні порошків механічних сумішей систем Fe–AlMg та Fe–TiAl, показали, що синтез утворення інтерметалідів Fe–Al не встигає завершитися, а відбувається лише окислення вихідних компонентів порошку Fe, Al, Mg і Ti (рис. 2, а, в). Відсутність утворення інтерметалідів Fe–Al при напиленні механічних сумішей пояснюється маловірогідністю зіткнення та коагуляції частинок в струмені напилення та їх ви-

сокою швидкістю охолодження при формуванні шару покриття, що обмежує взаємодію порошків з протіканням реакції утворення нових фаз між вихідними компонентами. У випадку використання для напилення МХС-порошків формуються покриття на основі інтерметаліду FeAl з наявністю продуктів окислення компонентів порошків (рис. 2, б, г). На відміну від покриттів, які було отримано напиленням механічних сумішей, у покриттів з МХС-порошків залізо в чистому вигляді присутнє в невеликій кількості. У покритті системи Fe–TiAl присутня фаза вихідного матеріалу порошку TiAl та продукт взаємодії заліза та сплаву TiAl – фаза Fe_2Ti . Компонент магнію в покритті системи Fe–AlMg, як і у випадку напилення механічної суміші, присутній у вигляді складного оксиду $MgAl_2O_4$.

У зв'язку з тим, що в покриттях систем Fe–AlMg і Fe–TiAl, які було отримано напиленням механічних сумішей, інтерметалідні фази Fe–Al не утворюються, а залишаються вихідні компоненти та їх оксиди, для подальших досліджень жаростійкості та корозійної тривкості використовували покриття, які було отримано напиленням МХС-порошків.

На рис. 3 представлені кінетичні залежності окислення детонаційних покриттів та сталі 45 у температурному інтервалі 700...800 °С. З характеру кривих у всьому дослідженому температурному інтервалі випливає, що механізм окислення

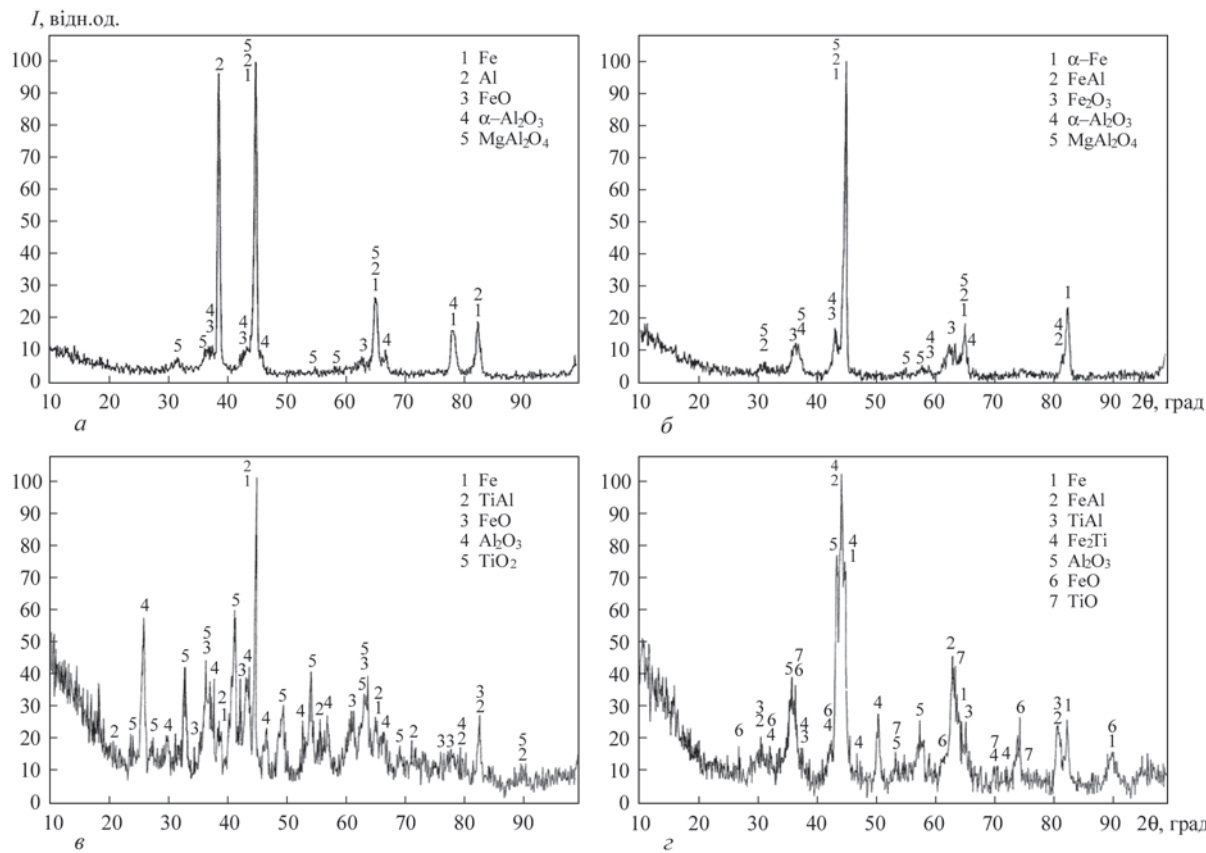


Рис. 2. Рентгенограми детонаційних покриттів, які було отримано напиленням порошків Fe–AlMg (а, б) і Fe–TiAl (в, г) з використанням механічних сумішей (а, в) і МХС-порошків (б, г)

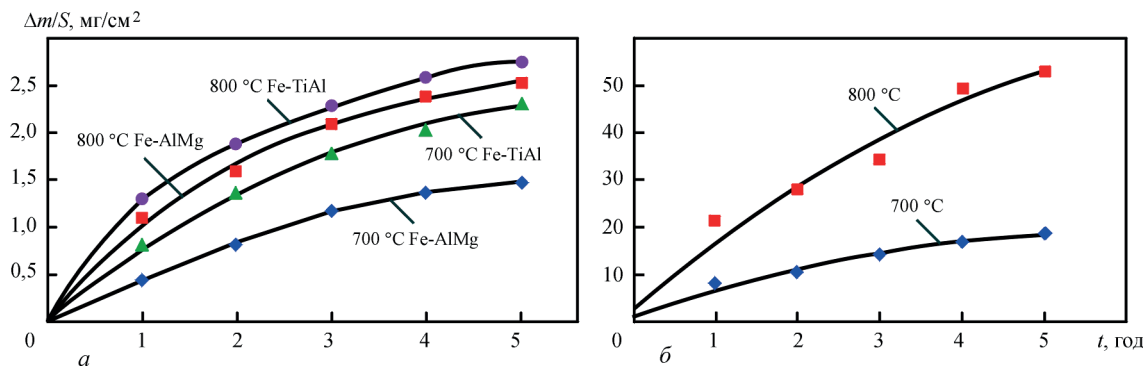


Рис. 3. Кінетичні криві окислення: а – детонаційних покриттів Fe–AlMg та Fe–TiAl; б – сталі 45 без покриття

Таблиця 2. Результати електрохімічних випробувань детонаційних покриттів Fe–AlMg та Fe–TiAl у різноманітних агресивних середовищах

Покриття	3%-й розчин NaCl				10%-й розчин H ₂ SO ₄			
	<i>E</i> _с , В	<i>i</i> _с , А/см ²	<i>K</i> _п , мм/рік	γ	<i>E</i> _с , В	<i>i</i> _с , А/см ²	<i>K</i> _п , мм/рік	γ
Fe–AlMg	–0,3	3,5·10 ^{–6}	0,038	13,3	–0,26	4,4·10 ^{–5}	0,452	1,3
Fe–TiAl	–0,28	1,1·10 ^{–6}	0,018	28,0	–0,22	2,4·10 ^{–5}	0,256	2,4
Сталь 45 без покриття	–0,50	5,0·10 ^{–5}	0,5035	–	–0,20	2,5·10 ^{–4}	0,6022	–

у всіх випадках підпорядковується параболичному часовому закону, який свідчить про те, що лімітуючою ланкою процесу є дифузійна стадія.

Отримані результати свідчать про високу жаростійкість детонаційних покриттів Fe–AlMg і Fe–TiAl, яка перевищує жаростійкість вуглецевої сталі у 6...10 разів при температурі 700 °C та у 18...20 разів при температурі 800 °C. Величина приросту маси $\Delta m/S \cdot t$ для всіх покриттів не перевищує 0,6 мг/см²·год, яка є порівнянною з характеристиками жаростійкості литих сплавів системи залізо–алюміній та дещо перевищує жаростійкість плазмових покриттів, які було отримано напиленням нелегованих порошків FeAl [17, 18]

Порівнюючи результати кінетики окислення детонаційних покриттів з легованих порошків на основі FeAl можна відзначити більш високу жаростійкість покриття Fe–AlMg, ніж покриття Fe–TiAl. Це пов’язано, найімовірніше, з наявністю у покритті Fe–AlMg алюміній–магнієвих шпінелей MgAl₂O₄, які мають більш високу стійкість до високотемпературного окислення, ніж оксиди алюмінію, заліза та титану, що формуються у покритті Fe–TiAl у процесі напилення.

Електрохімічні дослідження показали, що захисні властивості покриттів у 3%-му розчині NaCl на порядок вищі, ніж у 10%-му розчині H₂SO₄, що може бути пов’язано з різним видом деполаризації корозійного процесу (водневої у розчині сірчаної кислоти, кисневої у розчині 3%-го NaCl) [16].

Показано, що у розчині сірчаної кислоти детонаційні покриття, які нанесені на сталь 45, на один порядок знижує струм корозії і підвищують корозійну тривкість у 1,3...2,4 рази (табл. 2). Більш високі захисні властивості демонструють детонаційні покриття в розчині 3%-го NaCl. Проведені випробування показали, що в 3%-му роз-

чині NaCl швидкість корозії сталі 45 з нанесеними детонаційними покриттями зменшується в 13,3...28,0 разів порівняно зі сталлю без покриття. За корозійною тривкістю детонаційні покриття на основі FeAl не поступаються покриттям, нанесеними плазмовим методом [19].

Різниця в корозійній тривкості покриттів Fe–AlMg та Fe–TiAl пояснюється особливостями їхньої мікроструктури. Корозія може виникати на межах розподілу деформованих частинок (сплетів) у шарі покриття, та завдяки формуванню однорідної структури з наявністю по всій площі покриття тонких оксидних прошарків покриття системи Fe–TiAl мають більш високі корозійні властивості в досліджуваних електролітах.

Висновки

Розроблено Fe–Al-покриття, які було отримано методом детонаційного напилення, при якому в якості матеріалів для напилення були використані механічні суміші порошків заліза з алюмінієвим сплавом Al5Mg та інтерметалідом TiAl, а також порошки тих же складів, які було отримано методом механохімічного синтезу.

Встановлено, що в умовах детонаційного напилення при використанні механічних сумішей порошків не вдається забезпечити активну міжфазну взаємодію між компонентами та формування інтерметалідних фаз у покритті не відбувається. У випадку використання МХС-порошків формуються покриття на основі інтерметаліду FeAl з щільною ламелярною структурою, що складається з шарів металевих і оксидних складових, що чергуються.

Результати досліджень жаростійкості детонаційних покриттів систем Fe–AlMg і Fe–TiAl свідчать про їхню високу стійкість до високотемпе-

ратурного окислення в температурному діапазоні 700...800 °С. Використання для напилення порошків, легованих Ti, дозволяє підвищити жаростійкість вуглецевої сталі при температурі 700 °С у 6 разів, при температурі 800 °С – у 18 разів; у випадку використання порошків, легованих Mg, жаростійкість вуглецевої сталі підвищується в 10 разів при температурі 700 °С та в 20 разів при температурі 800 °С.

Встановлено, що нанесення детонаційних покриттів Fe–AlMg і Fe–TiAl дозволяє підвищити корозійну тривкість вуглецевої сталі в 3%-му розчині NaCl в 13,3 і 28,0 разів, відповідно.

Список літератури/References

- Deevi, S.C., Sikka, V.K. (1996) Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*, 4(5), 357–375. Doi: 10.1016/0966-9795(95)00056-9
- Stoloff, N.S. (1998) Iron aluminides: present status and future prospects. *Materials Sci. and Engin.:* A, 258(1-2), 1–14. doi: 10.1016/s0921-5093(98)00909-5
- Palm, M., Stein, F., Dehm, G. (2019) Iron Aluminides. *Annual Review of Materials Research*, 49(1). Doi: 10.1146/annurev-matsci-070218-125911
- Zamanzade, M., Barnoush, A., Motz, C. (2016) A Review on the Properties of Iron Aluminide Intermetallics. *Crystals*, 6(1), 10. Doi: 10.3390/cryst6010010
- Senderowski, C., Chodala, M., Bojar, Z. (2015) Corrosion Behavior of Detonation Gun Sprayed Fe–Al Type Intermetallic Coating. *Materials*, 8(3), 1108–1123. Doi: 10.3390/ma8031108
- Peng, J., Moszner, F., Rechmann, J. et al. (2019) Influence of Al Content and Pre-oxidation on the Aqueous Corrosion Resistance of Binary Fe–Al Alloys in Sulphuric Acid. *Corrosion Science*, 149, 123–132. Doi: 10.1016/j.corsci.2018.12.040
- Baligidad, R.G., Prasad, V.V. Satya, Rao, A. Sambasiva (2007) Effect of Ti, W, Mn, Mo and Si on microstructure and mechanical properties of high carbon Fe–10.5 wt-%Al alloy. *Materials Science and Technology*, 23(5), 613–619. Doi: 10.1179/174328407x158631
- Stein, F., Schneider, A., Frommeyer, G. (2003) Flow stress anomaly and order–disorder transitions in Fe₃Al-based Fe–Al–Ti–X alloys with X=V, Cr, Nb, or Mo. *Intermetallics*, 11(1), 71–82. Doi: 10.1016/s0966-9795(02)00187-5
- Zamanzade, M., Vehoff, H., Barnoush, A. (2013) Effect of chromium on elastic and plastic deformation of Fe₃Al intermetallics. *Intermetallics*, 41, 28–34. Doi: 10.1016/j.intermet.2013.04.01
- Krein, R., Schneider, A., Sauthoff, G., Frommeyer, G. (2007) Microstructure and mechanical properties of Fe₃Al-based alloys with strengthening boride precipitates. *Intermetallics*, 15(9), 1172–1182. Doi: 10.1016/j.intermet.2007.02.005
- Deevi, S.C. (2020) Advanced Intermetallic Iron Aluminide Coatings for High Temperature Applications. *Progress in Materials Science*, 100769. Doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100769
- Cinca, N., Guilemany, J. M. (2012) Thermal spraying of transition metal aluminides: An overview. *Intermetallics*, 24, 60–72. Doi: 10.1016/j.intermet.2012.01.020
- Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Burlachenko, A.N. et al. (2017) Structure and properties of alloyed powders based on Fe₃Al intermetallic for thermal spraying produced using mechanochemical synthesis method. *The Paton Welding J.*, 9, 33–39. https://doi.org/10.15407/tpwj2017.09.06
- Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Astakhov, E.A. et al. (2017) Detonation coatings of intermetallic powders of Fe–Al system produced using mechanical alloying. *The Paton Welding J.*, 4, 23–29. https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.05
- Похмурський В.І., Хома М.С. (2008) *Корозійна втома металів та сплавів*. Львів, СПОЛІОМ.
- Pokhmurskyi, V.I., Khoma, M.S. (2008) *Corrosion fatigue of metals and alloys*. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
- Сахненко М.Д., Ведь М.В., Ярошок Т.П. (2005) *Основи теорії корозії та захисту металів*. Харків, НТУ «ХПІ».
- Sakhnenko, M.D., Ved, M.V., Yaroshok, T.P. (2005) *Basics of the theory of corrosion and protection of metals*. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
- Hausild, P., Karlik, M., Skiba, T. et al. (2012) High Temperature Oxidation of Spark Plasma Sintered and Thermally Sprayed FeAl-Based Iron Aluminides. *Acta Physica Polonica A*, 122, 465–468. Doi: 10.12693/APHYSPOLA.122.465
- Marx, V., Palm, M. (2016) Oxidation of Fe–Al Alloys (5–40 at.% Al) at 700 and 900 °C. *Materials Science Forum*, 879, 1245–1250. Doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.879.1245
- Vihilianska, N.V., Gryshchenko, O.P., Iantsevych, K.V. et al. (2022) Corrosion resistance of plasma coatings based on composite powders with FeAl intermetallic. *The Paton Welding J.*, 12, 35–39. https://doi.org/10.37434/tpwj2022.12.05

DETONATION COATINGS PRODUCED BY SPRAYING OF ALLOYED POWDERS BASED ON Fe–Al INTERMETALLICS

N.V. Vigilianska, T.V. Tsymbalista, A.I. Kildii, C.V. Iantsevitch, Z.G. Ipatova, M.A. Vasylykivska

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

E-mail: pewinatoliya@gmail.com

The research results on the structure, phase composition, and properties of detonation coatings produced by spraying a mechanical mixture of Fe powders and AlMg and TiAl alloys, as well as composite powders of the same composition synthesized by the mechanochemical method, are presented. It was found that in the coatings produced with the use of mechanical mixtures of powders, the synthesis of intermetallic compounds does not occur and the coatings consist of initial components and their oxides. Therefore, it is advisable to use powders produced by the method of mechanochemical synthesis as spray materials. This results in the formation of coatings, in which the main phase is the Fe–Al intermetallic compound. Coatings of the Fe–AlMg and Fe–TiAl systems, produced by spraying of composite powders, are characterized by a dense lamellar structure consisting of alternating layers of metal and oxide components. The coatings exhibit high oxidation resistance in the temperature range of 700–800 °C, comparable to the oxidation resistance of cast iron–aluminium alloys, and allow increasing the oxidation resistance of carbon steels by 6–20 times. The corrosion resistance of Fe–AlMg and Fe–TiAl detonation coatings in a 3% NaCl solution exceeds the corrosion resistance of uncoated carbon steel by 13.3 and 28.0 times, respectively. The obtained results allow recommending to use the developed coatings for protection of parts operating in aggressive environments at temperatures of up to 800 °C. 19 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: intermetallic compounds of the Fe–Al system, mechanochemical synthesis, composite powders, detonation spraying, coating, oxidation resistance, corrosion resistance

Надійшла до редакції 30.11.2023

Отримано у переглянутому вигляді 07.12.2023

Прийнято 12.03.2024

ВПЛИВ ДИСПЕРСНОГО ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗВАРЮВАЛЬНИХ АЕРОЗОЛІВ НА ЇХ ТОКСИЧНІСТЬ

О.Г. Левченко¹, Ю.О. Полукаров¹, О.М. Гончарова², О.М. Безушко², О.С. Ільчук¹

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.

E-mail: mail@kpi.ua

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

Метою даного огляду є аналіз літературних даних про вплив дисперсного та хімічного складу зварювальних аерозолів на їх токсичність для подальшого розроблення заходів та засобів захисту органів дихання зварників. Показано, що загальна токсична дія зварювальних аерозолів залежить від їх хімічного складу та розміру частинок аерозолі. Наночастинки зварювальних аерозолів можуть мати зовсім інші фізико-хімічні властивості та біологічну дію в порівнянні з речовинами у звичайному фізико-хімічному стані. Вони відносяться до шкідливих речовин з підвищеним потенційним ризиком для здоров'я людини. Зварювальні аерозолі, потрапляючи в організм зварника, спричиняють токсичну дію, викликаючи різні захворювання органів дихання, нервової та кровоносної систем, онкологічні захворювання. Оскільки повністю видалити зварювальний аерозоль із зони зварювання неможливо, необхідно продовжити дослідження їх хімічного та дисперсного складу, рівнів виділень та способів зниження токсичної дії. У процесі зварювання в аерозолі переходять елементи, що входять до складу зварювальних матеріалів. Тому необхідно провести дослідження факторів, які впливають на збільшення інтенсивності виділень та токсичності зварювальних аерозолів. Бібліогр. 41, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: зварювання, аерозолі, гази, розміри, нанорозмірні частинки, токсичність, рекомендації

Вступ. Створення здорових та безпечних умов праці у зварювальному виробництві є актуальним завданням сьогодення. Одним з методів оздоровлення повітряного середовища є створення фільтровентиляційних агрегатів. Для цього необхідно мати дані хімічного аналізу, концентрації та розмірності частинок зварювального аерозолі (ЗА). Для пояснень процесу його утворення слід розглядати складні хімічні та фізико-хімічні процеси.

У літературі є дані [1] про біологічні дослідження ЗА, проникну здатність частинок різних фракцій у різні ділянки органів дихання, особливості їх поведінки в дихальних шляхах, класифікацію за розміром та місцем локалізації в органах дихання та дію елементів ЗА на організм.

З приводу особливостей впливу ЗА на організм людини, захворювань, які вони спричиняють та їх профілактики, написано чимало праць. Однак і сьогодні ця проблема продовжує залишатись актуальною. Більше того, виявляються нові дані про фізико-хімічні властивості цих аерозолів, механізми їх дії на організм людини та захворювання, які вони викликають.

Метою даного огляду є аналіз літературних даних про вплив дисперсного та хімічного складу ЗА на їх токсичність і обґрунтування необхідності досліджень у цьому напрямі для подальшого розроблення заходів та засобів захисту органів дихання зварників.

Розглядаючи властивості аерозолів, слід брати до уваги, з яких позицій проводиться ця оцінка. Так, з точки зору розробників зварювальних матеріалів, інженерів вентиляційних систем ключовими властивостями частинок аерозолів можуть бути перш за все ті, які визначають особливості їх поведінки у навколишньому середовищі, а з точки зору медиків – ті властивості, які характеризують вплив частинок на стан організму. Зрозуміло, що багато з цих властивостей можуть бути важливими в обох випадках. Тому таке розмежування до певної міри є умовним, але необхідним для кращого розуміння ролі властивостей аерозолів у тих чи інших процесах.

Розміри частинок мають вирішальне значення для їх проникнення в органи дихання та седиментації на окремих ділянках. Тому дослідженню цього параметра частинок медики приділяють особливу увагу.

Залежно від розміру частинки аерозолі можуть осідати в трахеї, бронхах та бронхіолах, а потім видалятися з цих органів за допомогою волосків. Якщо осілий пил погано розчиняється в слизовій оболонці та тканинах органів дихання, то він не викликає такого типового професійного захворювання зварників як пневмоконіоз [2]. Якщо ж осілі частинки пилу розчинні, то їх загальна токсична дія на організм може виявлятися залежно від хімічного та дисперсного складу цього аерозолі [1]. Так, у роботі [3] наглядно порівнюється

Левченко О.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-9737-7212>, Полукаров Ю.О. – <https://orcid.org/0000-0002-6261-3991>,

Гончарова О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-5213-6300>, Безушко О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-6148-1675>

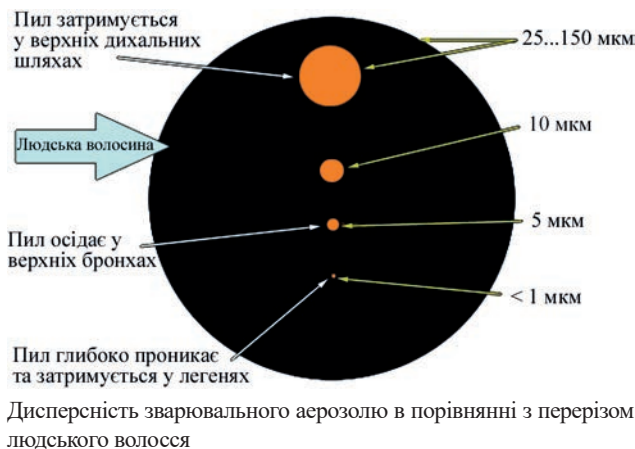
Ільчук О.С. – <https://orcid.org/0000-0001-6352-5320>

© О.Г. Левченко, Ю.О. Полукаров, О.М. Гончарова, О.М. Безушко, О.С. Ільчук, 2024

переріз людської волосини з дисперсністю зварювального аерозолі (рисунок).

Біологічні властивості зварювальних аерозолів. Частинки різного розміру по-різному впливають на організм зварника. Частинки діаметром менше 20 мкм можуть залишатися зваженими в повітрі [4], частинки розміром більше декількох мікрометрів осідають на стінках повітряних шляхів організму та виводяться назовні разом зі слизом. Близько 30 % частинок розміром 0,1...1,0 мкм, а також розміром менше 0,1 мкм (100 нм) осідають в легенях. Майже 100 % частинок діаметром менше 1 мкм проникають в організм дихальними шляхами [5]. Можливе проникнення нанорозмірних частинок через шкіру [6]. Також вони можуть потрапляти в мозок через нюховий нерв [7].

Не існує можливості створити зручну класифікацію, яка б характеризувала всі види аерозолів з урахуванням усіх їх можливих властивостей. Проте існує три групи частинок за розмірами, які мають різну здатність проникати в окремі ділянки органів дихання. Першу групу складають мікрочастинки, які поділяються на такі, що не проникають в органи дихання, і такі, що проникають в органи дихання. Останні, в свою чергу, поділяються за місцем їх локалізації на екстраторакальні (фракція поглинутих частинок, яким не вдалось проникнути в організм поза гортанню), трахеобронхіальні (які проникають через трахею і бронхи) та альвеолярні (ті, що проникають через альвеоли легень) згідно ДСТУ ISO 7708:2003 [8]. Окрему групу складають частинки розміром 500...1000 нм, які в силу низки причин практично не затримуються в органах дихання. Останню групу складають наночастинки розміром менше 100 нм. За своєю здатністю затримуватись в органах дихання вони розподіляються на три групи: частинки розміром 100...30 нм, які переважно седиментують в альвеолах; частинки розміром 30...5 нм, які здатні осідати практично у всіх ділянках органів дихання; частинки розміром менше 5 нм, що локалізуються переважно екстраторакально.



Крім того, важлива і форма частинок, яка багато в чому визначає їх аеродинамічні особливості, хімічну та біологічну активність, що, в свою чергу, визначає особливість їх дії на органи дихання [9]. Частинки зазубреної колючої форми небезпечніші за сферичні, бо подразнюють шкіру, легеневі тканини та слизові оболонки, даючи змогу просмоктуватися в організм інфекційним мікроорганізмам, що супроводжують пил або знаходяться в повітрі. Це призводить до атрофічних, гіпертрофічних, гнійних, виразкових та інших змін слизових оболонок, бронхів, легень, шкіри, що призводить до катару верхніх дихальних шляхів, виразкового захворювання носової перетинки, бронхіту, пневмонії, кон'юнктивіту, дерматиту та інших захворювань. Вдихання аерозолі, що потрапляє в легені, протягом тривалого часу спричиняє пневмоконіоз [2]. Найбільш небезпечна його форма – силікоз – розвивається при систематичному вдиханні пилу, що містить вільний діоксид кремнію SiO_2 . Металевий та інший пил може призвести до іншої форми пневмоконіозу – сидерозу, а також до хронічного бронхіту. Тому і ця властивість теж є важливим предметом досліджень медичної науки [10].

Величина поглинутої дози (маса пилу, що осідає на окремих ділянках органів дихання з маси пилу, який вдихається) та пилового навантаження (маса пилу, що накопичився в органах дихання протягом стажу роботи) значною мірою залежить від дисперсного складу і вагових концентрацій аерозолі, анатомо-фізіологічних особливостей органів дихання людини, способу дихання (ротом, носом), а також інтенсивності роботи, що виконується [1, 2].

Разом з тим слід також врахувати, що результати експериментальних досліджень на тваринах, у зв'язку з анатомо-фізіологічними відмінностями їх органів дихання від органів дихання людини, також не досить точно відображають процеси проникнення частинок у дихальні шляхи, їх аеродинаміку та відкладення на окремих ділянках. Загалом пилове навантаження у дрібних тварин буде більше ніж у людини, однак й елімінація пилу інтенсивніша [2].

Вплив ЗА на органи дихання унікальний. Немає жодного іншого матеріалу, який за структурою і за складом можна було б порівняти із ЗА. Це відбувається з кількох причин: 1) є багато факторів, які можуть погіршити здоров'я зварника – тепловий вплив, опіки, шум, дим, шкідливі гази і навіть незручна поза, яку доводиться приймати під час роботи; 2) сильна мінливість хімічного складу ЗА, яка залежить від місця роботи, використовуваного способу зварювання і умов праці та ін.; 3) шкідливі речовини можуть потрапляти в тіло різними шляхами [2].

Особливістю токсичної дії наночастинок (НЧ), що утворюються при зварювальних роботах, може бути те, що в повітрі робочої зони одночасно знаходяться НЧ різних хімічних елементів різного розміру. Переважно, до складу ЗА входять аерозолі металів та їх оксидів (заліза, марганцю, хрому, ванадію, вольфраму, алюмінію, титану, цинку, міді, нікелю та ін.), газоподібні фтористі сполуки, оксиди вуглецю, оксиди азоту, озон та ін.

В усьому світі, незважаючи на чисельні дослідження, відсутня однозначна відповідь з приводу небезпеки НЧ, оскільки немає повного розуміння їх фізико-хімічних властивостей, впливу на організм і віддалених наслідків цього впливу. Для абсолютної більшості наноматеріалів не повністю з'ясовані механізми надходження в організмі, біосумісності, біотрансформації, транслокації в органах і тканинах, елімінації з організму та, найголовніше, їх токсичності [11, 12].

НЧ металів, у тому числі й ті, що утворюються в процесі зварювальних робіт, починають інтенсивно реагувати з навколишнім середовищем, що призводить до їх окиснення та агломерації. Завдяки своїм дуже малим розмірам НЧ можуть проникати через біологічні мембрани і потрапляти в клітини, тканини та органи легше, ніж частинки більших розмірів. Найбільш поширеним шляхом потрапляння наноречовин в організм є інгаляційний. У дихальних шляхах перебувають чутливі закінчення нюхового і трійчастого нервів. Нюховий нерв може бути шляхом надходження НЧ до центральної нервової системи людини [13].

Незалежно від шляху надходження в організм, НЧ потрапляють в кровоносну систему і з кров'ю розносяться по всьому організму та можуть накопичуватися в кістковому мозку, центральній і периферичній нервовій системах, органах шлунково-кишкового тракту, легенях, печінці, нирках, лімфатичних вузлах, мати тривалий період напіввиведення. Безпосередній контакт НЧ металів з біологічними мембранами нерідко закінчується захопленням перших всередину клітини за допомогою низки механізмів [14].

Будь-яка хімічна сполука, будучи представленою в нанорозмірі, має велику кількість активних центрів. Такі зв'язки забезпечують високу реакційну здатність НЧ в реакціях з білками та нуклеїновими кислотами [15]. Наявність великої кількості активних центрів властиво майже всім НЧ [16]. Як результат виникає порушення мембранних структур та їх функцій з подальшим збільшенням проникності біомембран для інших токсикантів, розвитком запального процесу [11, 17].

Участь НЧ у процесі утворення кисневих радикалів залежить від поверхневих властивостей НЧ (фотохімічних, електричного поля, щільнос-

ті заряду і електронної провідності). Наслідком збільшення рівня вільних радикалів є руйнування макромолекул (наприклад, фосфоліпідів, нуклеїнових кислот і білків), порушення клітинних процесів (отримання енергії в мітохондріях тощо) [18].

Однією з особливостей НЧ є їх висока питома поверхня, що збільшує адсорбційну ємність. Ця властивість обумовлює здатність НЧ адсорбувати на свою поверхню і полегшувати транспорт всередину клітини різні контамінанти, що різко збільшує токсичність останніх [19].

НЧ притаманні певні електрофізичні властивості, які сприяють зміні структурно-енергетичних станів внутрішньоклітинних рідин за рахунок донорно-акцепторної взаємодії, що збільшує енергоємність міжклітинних і черезмембранних обмінів, з одного боку, і станом кластерів, що утворюються на поверхні НЧ, з іншого.

Вказані вище властивості НЧ до індукції вільних радикалів, пошкодження цитоскелету, високої проникності та можливості розташовуватися в ядрі клітини [20], пошкодження ДНК дозволяють припустити їх генотоксичну дію, яка, за даними досліджень, може обумовлювати більш високий канцерогенний ризик порівняно з ефектом мікрочастинок тих же сполук. НЧ, внаслідок своїх невеликих розмірів, можуть вбудовуватися в мембрани, проникати в клітинні органели, зв'язуватися з білками, нуклеїновими кислотами, і тим самим змінювати функції біоструктур.

Сукупність викладених чинників свідчить про те, що НЧ можуть мати зовсім інші фізико-хімічні властивості та біологічну (в тому числі, токсичну) дію в порівнянні з речовинами у звичайному фізико-хімічному стані, у зв'язку з чим вони відносяться до особливих видів токсичних речовин. Характеристика їх потенційного ризику для здоров'я людини і стану довкілля в усіх випадках є обов'язковою.

З теоретичної точки зору потенційну токсичність НЧ не можна передбачити, виходячи з токсичності об'ємних матеріалів такої ж хімічної природи. Згідно з даними літератури, у НЧ вона практично завжди більша, особливо при довготривалому надходженні в організм. Більшість результатів з оцінки токсичності НЧ отримано при одноразовому чи короткочасному введенні їх лабораторним тваринам. При цьому встановлено, що багато з досліджуваних матеріалів не мали гострої токсичності. Натомість ефекти хронічного впливу НЧ до теперішнього часу вивчені недостатньо, хоча саме вони можуть виявитися більш значущими, особливо для особин з довгим життєвим циклом, в тому числі, й для людини. Зараз майже нічого невідомо про накопичення НЧ в різних органах і тканинах, особливо при хронічному

надходженні в організм. Крім того, не можна виключити можливість трансформації самих НЧ під час їх міграції в організмі.

До основних проблем токсичності НМ відносять наступні. По-перше, токсичність НЧ не може бути похідною токсичності аналогів в макродисперсній фазі або у формі суцільної фази. По-друге, наявні токсикологічні методології засновані на визначенні токсичності речовини відповідно до масової концентрації, не прийнятні для НЧ, для яких лімітуючою може бути величина площі поверхні або число НЧ, але не масова концентрація як така. Крім того, токсикологічні властивості НЧ є результатом не тільки їх хімічного складу, але і різноманітності інших особливостей, таких, як поверхневі характеристики, розмір, форма, склад, хімічна реактивність тощо [20].

Принципова нестаціонарність і негомогенність зв'язку наночастинок з біологічною дією обумовлюється складною формою взаємодії, що постійно змінюється. Ці зміни можуть спричинити модифікацію властивостей поверхні НЧ, що, в свою чергу, потенційно може зменшувати або, навпаки, збільшувати токсичність частинок [21]. В результаті відбувається практично нескінченна кількість різновидів зав'язків між НЧ і біологічними об'єктами.

В цілому, про вплив НЧ на живі організми відомо, що вони завдяки невеликим розмірам і фізико-хімічним властивостям здатні долати тканинні бар'єри, проникати в клітини всіх органів і тканин. У подальшому НЧ можуть надходити в структури клітин, у тому числі в ядро. Проведені дослідження підтверджують залежність між виникненням серйозних захворювань, включаючи ракові, і тривалим впливом НЧ на організм. Швидше за все, немає механізмів активної їх детоксикації. Найбільш небезпечними вважаються НЧ зі складною конфігурацією [19].

Таким чином, токсичні ефекти НЧ, в тому числі ті, що утворюються при зварювальних роботах, залежать від багатьох вихідних станів як самих НЧ (в тому числі від їх розмірів та структурної організації, від фізичної природи) [19, 20], так і особливостей впливу НЧ на організм після проникнення в тканини і кров. Тому вони не є передбачуваними, а механізми розвитку токсичного ефекту – вкрай різноманітними.

Так, дослідження токсичності НЧ оксидів декількох металів [21], які можуть бути в ЗА, на щурах в різних часових умовах показала, що з урахуванням складу зварювальних матеріалів, зварник буде піддаватися одночасно комбінованому впливу декількох різних видів НЧ. Тому автори досліджень [22] дійшли висновків, про те, що крім трьох основних типів комбінованої дії ЗА на організм (адитивність, субадитивність і су-

перадитивність або синергізм), можуть відзначатися складні варіанти їх поєднання в залежності від того, з якого конкретного ефекту впливу вони оцінюються, а також від величини цього ефекту та рівня доз комбінованих факторів.

При характеристиці розвитку інтоксикації з великим числом ефектів може спостерігатися не тільки односпрямована дія, але й явний антагонізм, причому, нерідко одна й та ж пара токсикантів діє при одному співвідношенні доз односпрямовано, а при іншому – в протилежних напрямках. При додаванні третього токсиканта тип бінарної токсичності двох інших компонентів потрібної комбінації може залишитися в принципі таким самим, як і в його відсутності, але може змінитися як у бік підвищення, так і в бік зниження ефекту [21].

Оскільки велика питома поверхня вільних НЧ підсилює їх хімічну реакційну здатність, каталітичні та токсичні властивості багатьох НЧ не розпізнаються захисними системами організму [23–26], не піддаються біотрансформації та не виводяться з організму. Встановлено, що нерозчинні або погано розчинні НЧ при введенні їх лабораторним тваринам здатні викликати запалення легень, фіброз, новоутворення легень, генні мутації; проникати в міжклітинний простір, циркулювати в кровоносному руслі, переміщатися в інші органи [26].

Найбільш токсичними елементами під час зварювальних робіт, при інгаляційному шляху надходження у вигляді аерозолі можуть бути нанодисперсні оксиди марганцю, хрому, нікелю [27–29]. НЧ оксиду марганцю завдяки своїм невеликим розмірам та високій проникаючій здатності можуть викликати порушення різних відділів центральної нервової системи при різних шляхах надходження в організм, навіть в невеликих концентраціях. При інгаляційній дії частинки трьох- і чотирьохвалентного оксиду марганцю, що не перевищували 30 нм, можуть проникати в головний мозок безпосередньо по нюховому нерву. Найбільша кількість частинок при дослідженні фактичних концентрацій через 2 год експозиції відповідала розмірам 20...40 нм, а через 4 год експозиції – 30...50 нм, тобто в ході експерименту змінювався (збільшувався) розмір часток. Клінічна картина гострої інтоксикації характеризувалася подразненням, нейротоксичними ефектами дії, пригніченням дихання, поєднання яких могло спричинити загибель дослідних щурів.

Згідно з даними літератури інші складові ЗА також небезпечні. Так, при інгаляційному надходженні НЧ оксиду заліза розмірами 22 і 280 нм в організм щурів відзначено індукцію активних

форм кисню в клітинах, гіперемію, гіперплазію і фіброз тканини легенів, а також порушення системи згортання крові [27–29]. НЧ оксиду заліза біо-акумулюються в печінці та інших органах [29, 30]. При вдиханні НЧ міді виявлено виражене пошкодження нирок, печінки і селезінки у мишей [30, 31]. НЧ міді розміром 50 нм є генотоксичними та цитотоксичними, а також порушують цілісність клітинних мембран та індукують окислювальний стрес [31]. Встановлено також здатність НЧ оксиду цинку викликати пошкодження ДНК.

При проведенні зварювальних робіт в повітря робочої зони виділяється значна кількість металів (Mn, Fe, Cr, Si, Al, Mg, Co, Cu, K, Ni, Li, Na, K, Zn) [32], у тому числі в нанорозмірних величинах [33]. В реальних виробничих умовах наявність у повітрі НЧ, що містять тільки один який-небудь метал, є досить рідкісним винятком, а комбіноване забруднення декількома металами – правилом. Причому, кількісні співвідношення як хімічних елементів, так і величин їх часток в ЗА не мають виражених залежностей від складу зварювального матеріалу, умов зварювання та ін. [34]. Тому результати оцінки біологічної дії ЗА, як і інших комбінацій шкідливих виробничих факторів, потребують розробки оригінальних підходів для прогнозу безпечності та зменшення професійного ризику при їх використанні.

Захворювання, що викликають компоненти зварювальних аерозолів. Найпоширенішими компонентами ЗА, що утворюються при зварюванні низьковуглецевих і низьколегованих сталей, є: оксиди заліза, марганцю і кремнію. У ЗА можуть бути й інші сполуки легуючих елементів, напри-

клад, такі шкідливі речовини, як хром, нікель, мідь, алюміній, вольфрам, ванадій, титан, цинк тощо.

До найбільш шкідливих пилових виділень відносяться (табл. 1.) [35–38]:

– оксиди марганцю викликають захворювання нервової системи, легень, печінки і крові – інтоксикація марганцем;

– сполуки кремнію (у результаті їхнього вдихання – силікоз);

– сполуки хрому – накопичуються в організмі, викликаючи головні болі, захворювання травних органів, недокрів'я, рак;

Шкідливі газоподібні речовини, потрапляючи в організм, викликають іноді важкі ураження всього організму. До найбільш шкідливих газів, що виділяються при зварюванні і різанні, відносяться:

– оксиди азоту (особливо двоокис азоту NO₂), що викликають захворювання легень і органів кровообігу, важке ураження всього організму;

– оксид вуглецю (чадний газ) – безбарвний газ, має кислуватий смак і запах; будучи важчий за повітря в 1,5 рази, накопичується в нижній частині зони дихання; накопичуючись у приміщенні, витісняє кисень і при концентрації понад 1 % призводить до подразнення дихальних шляхів, викликає втрату свідомості, судороги, ураження нервової системи;

– озон утворюється при зварюванні в інертних газах (запах у великих концентраціях нагадує запах хлору), викликає подразнення очей, сухість у роті і болі в грудях;

– фтористий водень – безбарвний газ з різким запахом, діє на дихальні шляхи і навіть у невеликих концентраціях викликає подразнення слизових оболонок органів дихання.

Таблиця 1. Вплив шкідливих речовин на здоров'я зварників

Основні шкідливі речовини	Шкідливість для здоров'я при зварюванні
Зварювальні аерозолі	
Хромати (сполуки шестивалентного хрому)	Рак дихальних шляхів, головні болі, захворювання травних органів, недокрів'я
Оксид нікелю	Рак дихальних шляхів, алергія
Оксид кобальту	Токсичний, викликає рак, запалення слизової оболонки, легеневі захворювання
Сполуки кадмію	Токсичний, викликає рак, захворювання нирок, запалення слизової оболонки, легеневі захворювання
Оксиди заліза	Нетоксичні, але шкідливі для легенів
Оксиди алюмінію	Можливе накопичення в легенях
Оксид титану	Викликає захворювання легень
Сполуки барію	Токсичні, нудота
Свинець	Токсичний, нудота, шлункові, кишкові, нервові та ниркові хвороби
Фториди	Токсичні, запалення слизової оболонки
Оксид марганцю	Токсичний, запалення слизової оболонки, нервові проблеми
Мідь	Металева лихоманка
Токсичні гази	
Діоксид азоту (NO ₂)	Токсичний, запалення слизової оболонки, легенева недостатність, важке враження всього організму
Озон	Токсичний, подразнення слизової оболонки дихальних шляхів і очей, сухість у роті, болі в грудях та інше
Чадний газ (CO)	Токсичний, при концентрації більше 1 % призводить до запалення слизової оболонки, отруєння газом, втрату свідомості, судом, ураження нервової системи

Нормування зварювальних аерозолів. В усіх розвинутих країнах санітарними службами введені нормативи, що визначають гранично допустиму концентрацію (ГДК) шкідливих речовин при зварюванні в повітрі робочої зони виробничих приміщень. Це такі концентрації, що при щоденній роботі не викликають у працюючих профзахворювань. Їхня величина регламентована спеціальними санітарними нормами, де приведені дані про максимальні концентрації шкідливих газів і аерозолів біля робочого місця зварника (у зоні дихання), що нешкідливо для здоров'я при восьмигодинному робочому дні (табл. 2). Значення ГДК для нейтрального пилу, що не має отруйних властивостей, дорівнює 10 мг/м³ [39].

За токсичною дією шкідливі речовини, що утворюються при зварюванні, поділяють на кров'яні отрути, які взаємодіють з гемоглобіном крові і гальмують його здатність до приєднання кисню (оксид вуглецю); нервові отрути, які викликають збудження нервової системи, її виснаження, руйнування нервових тканин (наркотики – ацетилен); подразнюючі отрути – уражають верхні дихальні шляхи і легені (оксиди азоту, озон); печінкові отрути, дія яких супроводжується зміною та запаленням тканин печінки (цинк); алергени, що змінюють реактивну спроможність організму (нікель): канцерогени, що спричиняють утворення злоякісних пухлин (шестивалентний хром) тощо [37, 39, 40].

Якщо в повітрі присутні кілька речовин однонаправленої дії, то вони мають сумарний токсичний ефект і якість повітря має відповідати зазначеним нормативам за умови, що

$$C_1/ГДК_1 + C_2/ГДК_2 + \dots + C_n/ГДК_n \leq 1,$$

де C_1, C_2, C_n – концентрація речовин.

Донедавна ГДК хімічних речовин оцінювали, як максимально разові. Перевищення їх навіть протягом короткого часу заборонялося. Останнім часом для речовин (мідь, свинець, ртуть, фториди та ін.), що мають кумулятивні властивості (здатність накопичуватися в організмі), для гігієнічного контролю введена друга величина – середньозмінна ГДК. Наприклад, для фториду натрію середньозмінна ГДК складає 0,2 мг/м³, що значно нижче, ніж його максимально разова ГДК, яка становить 1 мг/м³.

За останні роки фахівцями ІЕЗ ім. Є.О. Патона виконано роботи по гармонізації міжнародних стандартів ISO 15011. Застосування міжнародних стандартів допускає використання національних нормативних документів при виконанні гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів і не обмежує використання для хімічного аналізу проб зварювальних аерозолів різні методики і, навіть ті, що використовуються в Україні. В 2007–2008 рр. міжнародні стандарти було перекладено з англійської мови на українську, здійснено їх технічне редагування та оформлення, а 4 серпня 2008 р. Держспоживстандарт України надав їм чинності (наказ № 265 з 2010-01-01).

Таблиця 2. ГДК типових шкідливих газів і аерозолів, що утворюються при зварюванні, згідно з гігієнічним регламентом [40]

Номер п/п	Назва речовини	Величина ГДК мг/м³	Агрегатний стан в умовах виробництва	Клас небезпеки	Особливості дії на організм
1	Діоксид азоту	2	п	3	Г
2	Оксид азоту	5	п	3	Г
3	Озон	0,1	п	1	Г
4	Солі фтористоводневої кислоти (по F): фториди Al, Mg, Ca, Cu, Cr, Sr	2,5/0,5	а	3	
5	Оксид хрому в перерахуванні Cr_2O_3 (Cr^{3+})	1	а	3	А
6	Хромати, біхромати в перерахунку CrO_3 (Cr^{6+})	0,01	а	1	К, А
7	Марганець в ЗА при його вмісту: а) до 20 % б) від 20 %	0,2 0,1	а а	2 2	
8	Нікель, оксиди нікелю та інші сполуки (по нікелю)	0,05	а	1	К, А
9	Солі фтористоводневої кислоти (по F): фториди Al, Mg, Ca, Cu, Cr, Sr	2,5/0,5	а	3	
10	Фтористий водень (в перерахунку на F)	0,5/0,1	п	1	Г
12	Титан та його діоксид	10	а	4	Ф
13	Залізо	10,0	а	4	
15	Оксид заліза	6,0	а	4	
16	Мідь (по Cu)	1/0,5	а	2	
17	Оксид магнію	4	а	4	

Примітка: *ГДК для загальної маси аерозолію. 1. Якщо в графі «Величина ГДК» наведені дві величини, то це означає, що в чисельнику максимальна, а в знаменнику – середньозмінна ГДК. 2. Умовні позначення: п – пари і/або газ; а – аерозоль. 3. Г – речовини з гостронаправленим механізмом дії, що потребують автомеханічного контролю за їх вмістом в повітрі. А – речовини, здатні викликати алергічні захворювання у виробничих умовах, К – канцерогени, Ф – аерозолі переважно фіброгенної дії.

Згідно цих стандартів для оцінки шкідливого впливу ЗА, зварювальні матеріали класифікують в залежності від рівня виділень і токсичності аерозолів, які утворюються під час зварювання [41].

Існуючі заходи захисту від зварювальних аерозолів. Для зменшення виділень ЗА в повітря робочої зони та для зниження їх шкідливого впливу на організм користуються, переважно, санітарно-технічними та технологічними заходами, а також засобами індивідуального захисту [35].

До санітарно технічних заходів відносяться: організація місцевої та загальнообмінної вентиляції. До цього часу у зварювальному виробництві застосовують, переважно, загальнообмінну вентиляцію, принцип дії якої полягає в розведенні шкідливих виділень до ГДК великим об'ємом чистого припливного повітря, що подається в приміщення. Така система вентиляції, досягаючи середніх нормованих значень по запиленості в цеху, практично не впливає на джерело утворення ЗА: зварник практично залишається в клубах отруйного аерозолу. Найбільш несприятливі умови праці спостерігаються в замкнутому просторі. Причинами недостатньої ефективності застосовуваної вентиляції є те, що не вдається здійснити в повній мірі уловлювання шкідливих виділень безпосередньо в місці їх утворення і вони поширюються по приміщенню, забруднюючи все навколишнє повітря. Загальнообмінна вентиляція не тільки пов'язана з великими витратами, але також не в змозі забезпечити необхідну чистоту повітря безпосередньо на робочих місцях зварників. Тому боротьба зі зварювальними аерозолями і газами має здійснюватись шляхом локалізації шкідливих виділень у місці їх утворення. Там, де є можливість застосувати місцеву вентиляцію без погіршення технологічного процесу, їй повинна віддаватися перевага. Загальнообмінна вентиляція повинна застосовуватися як додаткова або коли застосування місцевих витяжних пристроїв неможливо (зварювання великих виробів в машинобудуванні і суднобудуванні; відсутність фіксованих місць зварювання і т.д.). Необхідно застосування місцевих витяжних пристроїв відповідних конструкцій з розташуванням їх в місцях найбільших концентрацій ЗА [35].

Засоби індивідуального захисту застосовуються лише у випадках, якщо всі зазначені заходи виявилися малоефективними. Застосування засобів індивідуального захисту органів дихання зварників (ЗІЗОД) є однією з найбільш поширених заходів попередження несприятливого впливу на працюючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів, забезпечує захист зварників не тільки від ЗА, а й від оптичного випромінювання, теплового навантаження, шуму, іскор, бризок і т.д. При

цьому суттєво змінилися принципи, на підставі яких розробляють ЗІЗОД зварників – вони перетворилися в комплексні, тобто захищають обличчя, очі і систему дихання. З огляду на провідну роль ЗА в розвитку захворювань зварників, необхідно використовувати ЗІЗОД (наголовних щитків і захисних масок) з системою примусової подачі очищеного повітря в зону дихання (наприклад, для зварювання в замкнутих просторах, де неможливе застосування вентиляції). У даний час розроблені нові сорбційно-фільтруючі матеріали для використання в протиаерозольних і протигазових зварювальних респіраторах, які забезпечують надійний захист органів дихання не тільки від ЗА, але й від токсичних газів (фтористого водню, озону тощо).

Технологічні заходи полягають в застосуванні більш досконалих в гігієнічному відношенні зварювальних технологій і матеріалів.

Висновки

На основі аналізу літературних даних щодо захисту зварників від аерозолів і газів, які утворюються при електричному зварюванні різними способами, можна сформулювати такі висновки.

1. Показано, що біологічні властивості зварювальних аерозолів залежать від їх хімічного складу та розміру частинок аерозолу. Вони можуть осідати в трахеї, бронхах і легенях. Загальна токсична дія розчинних частинок аерозолу може виявлятися залежно від їх хімічного та дисперсного складу.

2. Наночастинки зварювальних аерозолів можуть мати зовсім інші фізико-хімічні властивості та біологічну дію в порівнянні з речовинами у звичайному фізико-хімічному стані. Вони відносяться до шкідливих речовин з підвищеним потенційним ризиком для здоров'я людини.

3. Найбільш шкідливими компонентами зварювальних аерозолів є хромати та біхромати натрію і калію, оксиди нікелю, міді та марганцю, які належать до першого, другого та третього класів небезпеки.

4. Зварювальні аерозолі, потрапляючи в організм людини, спричиняють токсичну дію, викликаючи різні захворювання органів дихання, нервової та кровоносної систем, онкологічні захворювання. Оскільки повністю видалити зварювальний аерозоль із зони зварювання неможливо, необхідно продовжити дослідження їх хімічного та дисперсного складу, рівнів виділень та пошук нових методів зниження їх токсичної дії на організм зварників.

5. У процесі зварювання в аерозолі переходять елементи, що входять до складу зварювальних матеріалів. Тому необхідно провести досліджен-

ня залежностей хімічного і дисперсного складу аерозолів від складу зварювальних матеріалів, їх впливу на інтенсивність виділень та токсичність зварювальних аерозолів. Для цього слід створити нову методику визначення впливу нанорозмірних частинок зварювального аерозолію на організм людини.

6. До цього часу зниження шкідливого впливу зварювальних аерозолів на організм здійснюється застосуванням технологічних та санітарно-технічних заходів, а також використанням засобів індивідуального захисту. Найбільш ефективними заходами є застосування місцевої та загальнообмінної вентиляції.

Список літератури/References

1. Кашуба М.О. (2006) Седиментаційна здатність та проникність зварювальних аерозолів в окремі ділянки органів дихання. *Український журнал з проблем медицини праці*, 2, 17–22.
2. Kashuba, M.O. (2006) Sedimentation capacity and penetrability of welding aerosols in separate areas of respiratory systems. *Ukrainskyi Zh. z Problem Medytsyny Pratsi*, 2, 17–22 [in Ukrainian].
3. Кундієв Ю.І., Басанець А.В. (2012) Пневмоконіоз: епідеміологія, рання діагностика, профілактика. *Авіценна*, 191.
4. Kundiev, Yu.I., Basanets, A.V. (2012) Pneumoconiosis: Epidemiology, early diagnostics, preventive measures. *Avitsena*, 191 [in Ukrainian].
5. Tanneberger, J.F.W.G. (2009) Schweißrauch am Arbeitsplatz – Gefahr für die Gesundheit. *Der Praktiker*, 9, 328.
6. Jenkins, N.T., Pierce, W.M.G., Eagar, T.W. (2005) Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes. *Welding J.*, 84(10), 156–163.
7. Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S. et al (2010) Physicochemical characterization of different welding aerosols. *Anal Bioanal Chemistry*, 10, 1773–1789.
8. Hoet, P.H.M., Brueske-Hohlfeld, I., Salata, O.V. (2004) Nanoparticles – known and unknown health risks. *J. of Nanobiotechnology*.
9. Сердюк А.М., Кундієв Ю.І., Трахтенберг І.М. та ін. (2009) Нанотоксикологія: напрямки досліджень. *Довкілля та здоров'я*, 1 (48), 3–7.
10. Serdyuk, A.M., Kundiev, Yu.I., Trakhtenberg, I.M. et al. (2009) Nanotoxicology: Directions of investigations. *Dovkillya ta Zdoroviya*, 1 (48), 3–7 [in Ukrainian].
8. (2003) ДСТУ ISO 7708:2003. Якість повітря. Визначення розміру фракцій під час відбирання проб частинок, які впливають на здоров'я людини. Наказ № 166 від 02.10.2003.
9. (2003) DSTU ISO 7708:2003. Air quality. Particle size fraction definitions for health-related sampling. No. 166, 02.10.2003 [in Ukrainian].
9. Лановенко О.Г., Остапівщина О.О. (2013) Словник – довідник з екології. Навчально-методичний посібник. ПП Вишесирський В.С.
10. Lanovenko, O.G., Ostapishyna, O.O. (2013) Dictionary-handbook of ecology. Training-methodological manual. PP Vyshesyrskyy V.S. [in Ukrainian].
10. Калінчак В.В., Черненко О.С., Контуш С.М. та ін. (2019) Фізика медичних аерозолів. Одес. нац. ун-т ім. І.І. Мечникова.
11. Kalinchak, V.V., Chernenko, O.S., Kontush, S.M. et al. (2019) Physics of medical aerosols. Odesa Nats. Un-t [in Ukrainian].
11. Леоненко Н.С., Деметська О.В., Леоненко О.Б. (2016) Особливості фізико-хімічних властивостей та токсичної дії наноматеріалів – до проблеми оцінки небезпечного впливу їх на живі організми (огляд літератури). Сучасні проблеми токсикології, харчової та хімічної безпеки. *Український журнал сучасних проблем токсикології*, 1, 64–76.
12. Leonenko, N.S., Demetska, O.V., Leonenko, O.B. (2016) Peculiarities of physicochemical properties and toxic action of nanomaterials – to problem of evaluation of their hazardous effect on living organisms (Literature review). Current problems of toxicology, food and chemical safety. *Ukr. Zh. Suchasnykh Problem Toksykologii*, 1, 64–76 [in Ukrainian].
12. Васьковець Л.А. (2022) Професійні ризики при впливі наночастинок [Електронний ресурс]: 36. доп. 14-ї Міжнар. наук.-метод. конф. та 149-ї Міжнар. наук. конф. Європ. Асоц. наук з безпеки (EAS), 1-2 грудня, 162–165.
13. Vaskovets, L.A. (2022) Professional risks under impact of nanoparticles. In: Proc. of 14th Int. Sci.-Method. Conf. and 149th Sci. Conf. of Europ. Assoc. Safety (EAS), 1-2 December, 162–165.
13. Donaldson, K., Stone, V. (2003) Current hypotheses on the mechanisms of toxicity of ultrafine particles. *Annali dell'Istituto superiore di sanita*, 39(3), 405–410.
14. Khanna, P., Ong, C., Bay, B.H., Baeg, G.H. (2015) Nanotoxicity: an interplay of oxidative stress, inflammation and cell death. *Nanomaterials*, 5(3), 1163–1180. <https://doi.org/10.3390/nano5031163>.
15. Knaapen, A.M., Borm, P., Albrecht, C., Schins, R.P. (2004) Inhaled particles and lung cancer. Part A: Mechanisms. *International journal of cancer*, 109(6), 799–809. <https://doi.org/10.1002/ijc.11708>.
16. Risom, L., Møller, P., Loft, S. (2005) Oxidative stress-induced DNA damage by particulate air pollution. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 592(1-2), 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2005.06.012>.
17. Jiang, J., Oberdörster, G., Elder, A. et al. (2008) Does nanoparticle activity depend upon size and crystal phase. *Nanotoxicology*, 2(1), 33–42. <https://doi.org/10.1080/17435390701882478>.
18. Lu, N., Zhu, Z., Zhao, X. et al. (2008) Nano titanium dioxide photocatalytic protein tyrosine nitration: a potential hazard of TiO₂ on skin. *Biochemical and biophysical research communications*, 370(4), 675–680. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2008.04.010>.
19. Lewinski, N., Colvin, V., Drezek, R. (2008) Cytotoxicity of nanoparticles. *Small*, 4(1), 26–49. <https://doi.org/10.1002/smll.200700595>.
20. Шаторна В.Ф., Гарець В.І., Крутенко В.В. та ін. (2012) Наноматеріали: Стан сучасних досліджень та використання в біології, медицині та ветеринарії. Огляд літератури. *Вісник проблем біології і медицини*, 3, Т. 2, 29–32.
21. Shatorna, V.F., Garets, V.I., Krutenko, V.V. et al. (2012) Nanomaterials: State-of-the-art of current investigations and application in biology, medicine and veterinary science (Literature review). *Visnyk Problem Biologii i Medycyny*, 3(2), 29–32.
21. Tong, T., Wilke, C.M., Wu, J. et al. (2015) Combined toxicity of nano-ZnO and nano-TiO₂: from single-to multinanomaterial systems. *Environmental science & technology*, 49(13), 8113–8123. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02148>.
22. Minigalieva, I.A., Katsnelson, B.A., Privalova, L.I. et al. (2015) Attenuation of combined nickel (II) oxide and manganese (II, III) oxide nanoparticles' adverse effects with a complex of bioprotectors. *International journal of molecular sciences*, 16(9), 22555–22583. <https://doi.org/10.3390/ijms160922555>.
23. Renwick, L.C., Donaldson, K., Clouter, A. (2001) Impairment of alveolar macrophage phagocytosis by ultrafine particles. *Toxicology and applied pharmacology*, 172(2), 119–127. <https://doi.org/10.1006/taap.2001.9128>.
24. Renwick, L.C., Brown, D., Clouter, A., Donaldson, K. (2004) Increased inflammation and altered macrophage chemotactic responses caused by two ultrafine particle types. *Occupational and Environmental Medicine*, 61(5), 442–447. <http://dx.doi.org/10.1136/oem.2003.008227>.
25. Nemmar, A., Hoet, P.M., Vanquickenborne, B. et al. (2002) Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation*, 105(4), 411–414. <https://doi.org/10.1161/hc0402.104118>.
26. Shvedova, A.A., Kisin, E.R., Mercer, R. et al. (2005) Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to sin-

- gle-walled carbon nanotubes in mice. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*, 289(5), 698–708. <https://doi.org/10.1152/ajplung.00084.2005>.
27. Bahadar, H., Maqbool, F., Niaz, K., Abdollahi, M. (2016) Toxicity of nanoparticles and an overview of current experimental models. *Iranian biomedical journal*, 20(1), 1. <https://doi.org/10.7508%2Fibj.2016.01.001>
 28. Zhu, M.T., Feng, W.Y., Wang, B. et al. (2008) Comparative study of pulmonary responses to nano-and submicron-sized ferric oxide in rats. *Toxicology*, 247(2-3), 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2008.02.011>.
 29. Naqvi, S., Samim, M., Abidin, M.Z. et al. (2022) Concentration-Dependent Toxicity of Iron Oxide Nanoparticles Mediated by Increased Oxidative Stress [Retraction]. *International Journal of Nanomedicine*, 17, 1459–1460. <https://doi.org/10.2147/IJN.S367448>.
 30. Albukhaty, S., Naderi-Manesh, H., Tiraihi, T. (2013) In vitro labeling of neural stem cells with poly-L-lysine coated super paramagnetic nanoparticles for green fluorescent protein transfection. *Iranian biomedical journal*, 17(2), 71. <https://doi.org/10.6091%2Fibj.1114.2013>.
 31. Chen, Z., Meng, H., Xing, G. et al. (2006) Acute toxicological effects of copper nanoparticles in vivo. *Toxicology letters*, 163(2), 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2005.10.003>.
 32. Levchenko, O.G., Lukianenko, A.O., Demetska, O.V., Arlamov, O.Yu. (2018) Influence of Composition of Binder of Electrodes Coating on Cytotoxicity of Welding Aerosols. In *Materials Science Forum*. *Trans Tech Publications*, 927, 86–92. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.927.86>.
 33. Levchenko, O., Demetska, O., Polukarov, Y. et al. (2023) Identifying patterns of aerosols formation during contact butt fusion welding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10 (123), 30–38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281011>.
 34. Кундієв Ю.І., Корда М.М., Кашуба М.О., Демецька О.В. (2015) *Токсикологія аерозолів: монографія*. ТДМУ «Укрмедкнига».
 - Kundiev, Yu.I., Korda, M.M., Kashuba, M.O., Demetska, O.V. (2015) *Toxicology of aerosols: Monography*. TDMU Ukrmedknyga [in Ukrainian].
 35. Левченко О.Г. (2015) *Сварочные аэрозоли и газы: процессы образования, методы нейтрализации и средства защиты*. Киев, Наукова думка.
 - Levchenko, O.G. (2015) *Welding aerosols and gases: Processes of formation, methods of neutralization and security facilities*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 36. (2006) Exposition au manganèse: l'IIW se prononce. Actualités profession. Hygiène du travail. *Soudage et techniques connexes*, 11/12, 15.
 37. (2006) Fumees de soudage: valeurs limites, évaluation des risques, mesures de prévention. Etudes et recherche. Hygiène et sécurité. *Soudage et techniques connexes*, 7/8, 31–33.
 38. Pohlmann, G., Holzinger, K., Spiegel-Ciobanu, V.E. (2012) Vergleichende Untersuchungen zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel in Rauchen beim Schweißen und bei verwandten Verfahren-Teil 2: *Ergebnisse und Diskussion*. *Schweißen und Schneiden*, 64(6), 352.
 39. Matusiak, J., Wycislik, J. (2009) Zdrowie i bezpieczeństwo przy produkcji spawalniczej. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, 53(3), 24–35.
 40. (2020) *Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони*. Наказ МОЗ України № 1596 від 14.07.2020.
 - (2020) *Hygienic regulations of chemical substances in air of working area*. Order of MOH of Ukraine No. 1596, 14.07.2020.
 41. (2008) ДСТУ ISO 15011-4:2008. *Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів. Частина 4. Форма для запису даних про аерозолі*. Київ, Держспоживстандарт України. Наказ № 490 від 22.12.2008.
 - (2008) DSTU ISO 15011-4:2008. *Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling aerosols and gases. Pt 4: Form for recording data on aerosols*. Kyiv, Derzhspozhyvstandart of Ukraine. Order No. 490, 22.12.2008 [in Ukrainian].

INFLUENCE OF DISPERSED AND CHEMICAL COMPOSITION OF WELDING AEROSOLS ON THEIR TOXICITY

O.G. Levchenko¹, Yu.O. Polukarov¹, O.M. Goncharova², O.M. Bezushko², O.S. Ilchuk¹

¹NTUU «Kyiv Igor Sikorsky Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: mail@kpi.ua

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The aim of this review is to analyze the literature data on the impact of dispersive and chemical composition of welding aerosols on their toxicity for the further development of measures and means of protection of respiratory organs of welders. It is shown that the total toxic effect of welding aerosols depends on their chemical composition and the size of aerosol particles. Nanoparticles of welding aerosols can have completely different physicochemical properties and biological effects compared to substances in the normal physicochemical state. They belong to harmful substances with an increased potential risk to human health. Welding aerosols, getting into the body of the welder, cause toxic effects, resulting in various diseases of respiratory organs, nervous and circulatory systems, cancer diseases. Since it is impossible to completely remove welding aerosol from the welding zone, it is necessary to continue the study of their chemical and dispersed composition, levels of emissions and methods of reducing toxic effects. In the process of welding, the elements contained in welding materials are transferred in aerosol. Therefore, it is necessary to study the factors affecting an increase in the intensity of emissions and toxicity of welding aerosols. 41 Ref., 2 Tabl., 1 Fig.

Keywords: welding, aerosols, gases, sizes, nano-size particles, toxicity, recommendations

Надійшла до редакції 15.11.2023

Отримано у переглянутому вигляді 24.11.2023

Прийнято 11.01.2024

**INTERNATIONAL CONFERENCE
ON WELDING AND RELATED
TECHNOLOGIES**

07-10.10.2024
wrt2024.com.ua
Kyiv, Ukraine

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ВИСТАВЦІ «ЗВАРЮВАННЯ І РІЗАННЯ – 2023» В ЕССЕНІ

С.Ю. Максимов, А.А. Голякевич, О.С. Котельчук

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

На основі аналізу матеріалів виставки «Зварювання і різання – 2023», що відбувалася в місті Ессен, Німеччина, а також власних вражень від зустрічей з провідними виробниками і розробниками матеріалів для зварювання та різання, наведено узагальнений погляд авторів на сучасні тенденції розвитку світового ринку зварювальних матеріалів для дугових процесів з’єднання матеріалів плавленням. Бібліогр. 3, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: дугове зварювання плавленням, зварювальні матеріали

Світовий ринок зварювальних матеріалів і його розвиток. За оцінками аналітиків світовий ринок зварювальних матеріалів у 2022 р. досяг рівня 12,61 млрд USD і очікувалось його зростання до 12,98 у 2023 р. та до 17,66 млрд USD у 2030 р. при середньому щорічному темпі зростання 4,5 % на цей період [1]. Тут під зварювальними матеріалами розуміють флюси та присадкові металеві матеріали, які використовуються у зварювальних процесах. Такі зварювальні матеріали дозволяють забезпечити ефективне, з точки зору витрат коштів, з’єднання металоконструкцій та захист розплавленого металу від небажаного або шкідливого впливу повітря, запобігаючи утворенню пор та інших дефектів у зварному шві. Завдяки цьому вони знайшли широке застосування у будівництві, а також в автомобільній, енергетичній, суднобудівній та аерокосмічній галузях промисловості. Останні тенденції розвитку ринку зварювальних матеріалів прогнозують досить суттєве зростання протягом наступних шести років [1] (рис. 1).

Прогнозується розширення використання у зварювальній промисловості так званих розумних («smart») матеріалів, що сприяє зростанню ринку. Енергетично-ефективні та екологічно-дружні «розумні» матеріали захоплюють усе більшу частку ринку. На сьогодні склалося загальне зростаюче розуміння фундаментальної поведінки матеріалів на атомному рівні при поєднанні двох різнорідних металів без втрати їх міцності, корозійної стійкості або інших експлуатаційних властивостей. Крім того, «розумний» матеріал має, як кажуть, «вбудований комп’ютерний чіп» (його власну невід’ємну властивість), що дозволяє відслідковувати життєвий шлях зварного шва і зварного з’єднання та забезпечення надійної багатофункціональної експлуатації конструкції.

На додаток, інкорпорування таких матеріалів сприяє зниженню споживання енергії й зменшує потреби в застосуванні попереднього і післязварювального підігрівання. Виробники, конструктори і зварники отримують переваги від інтеграції таких

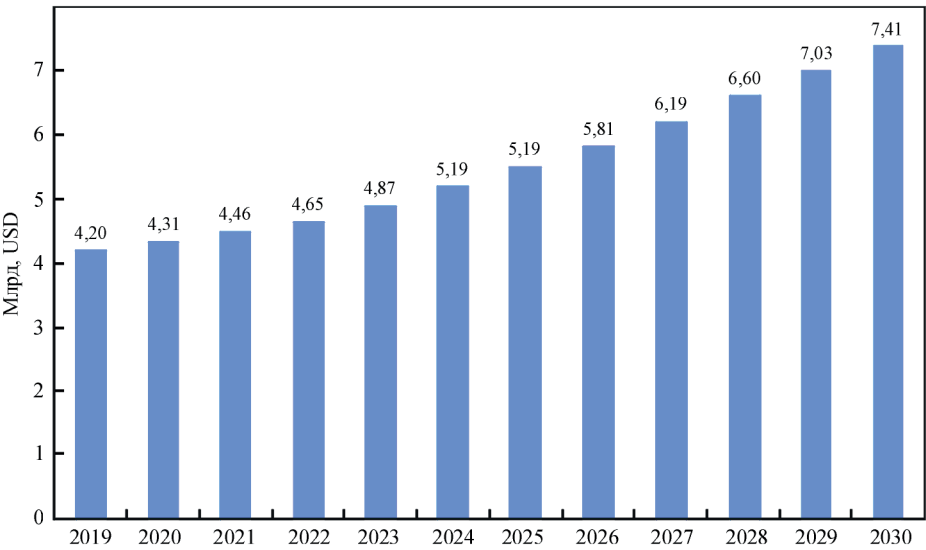


Рис. 1. Прогнозована ємність азійсько-тихоокеанського ринку зварювальних матеріалів у 2019–2030 рр. [1]

© С. Ю. Максимов, А. А. Голякевич, О. С. Котельчук, 2024

технологій для підвищення ефективності виробничого циклу в цілому. Таким чином, розширення застосування «розумних» ресурсів в подальшому буде позитивно впливати на розширення ринку зварювальних матеріалів по всьому світу.

Щодо рушійних факторів, то в першу чергу слід зауважити, що різноманітне застосування зварювальних технологій, насамперед, відповідно до вимог автомобілебудівної і паливно-енергетичної галузей промисловості суттєво прогресувало в останні роки за рахунок застосування найбільш фундаментальних й адаптивних способів конструювання металів. Зварювальні технології широко використовуються при виготовленні металоконструкцій в різних секторах економіки. Наприклад, зварювання є важливою процедурою при будівництві, зведенні мостів і прокладанні трубопроводів, а також при реалізації інших інженерних проєктів. На протязі останніх років автомобілебудування було постійно зростаючою галуззю застосування зварювального виробництва для виготовлення деталей. Такі властивості, як міцність з'єднань, гнучкість конструкцій, які легко адаптуються до різноманітних потреб, а також помітний ефективний приріст конструктивної якості зварних несучих металоконструкцій спонукають автомобілебудівників до застосування різноманітних зварювальних процедур. Транснаціональні автомобілебудівники все більше інвестують у розміщення й впровадження зварювальних виробничих потужностей у різноманітних локаціях по всьому світу.

На цьому тлі небезпідставно вважають, що ринок зварювальних матеріалів є підготовленим для швидкого зростання з наявними високопотенційними галузями, що підпадають під розширені урядові інвестиції в інфраструктурне будівництво. Крім того, ринок має суттєвий сегмент використання в автомобілебудівній галузі промисловості для створення високоякісних автомобільних деталей. Завдяки покращенню характеристик безпеки транспортних засобів і розвитку автомобільних конструкцій, ця галузь промисловості зміцнила свої позиції на ринку. Аналогічно, в країнах із зростаючою економікою, таких як КНР, Індія й Південна Африка, запуск різноманітних розробок і проєктів та надання місця для їх реалізації суттєво підтримують будівельну галузь.

Вірогідно, енергетичний сектор скористається зростаючими вимогами стосовно потужності установок поновлюваних джерел енергії, в першу чергу сонячних та вітрових електростанцій. Вважають, що на прогнозований період будівництво трубопроводних систем також буде сприяти зростанню ринку.

Наприклад, в Німеччині, яка, як вважають, має найпотужнішу економіку в Європі, об'єми зва-

ривально-технологічного виробництва у 2022 р. зросли на 10,4 % [2], хоча зростання загальної кількості внутрішньої продукції в світовій економіці сповільнилось під впливом високих цін на енергоресурси і значної невизначеності – збільшилося у тому ж році лише на 3,4 %. Різниця у темпах розвитку між розвиненими економіками (2,7 %) і економіками, що швидко розвиваються (більше 4 %), менша ніж у попередні роки. В Європейському Союзі (27 країн) економіка виросла на 3,5 %, у Німеччині – лише на 1,9 %.

Найбільшими закордонними покупцями німецьких зварювальних технологій знову були США (15,9 %) і КНР (12,5 %) (рис. 2). При цьому 42,9 % німецького експорту (1011,53 млн євро) залишилося у Європейському Союзі (27 країн) (2,4 % надійшло в Сполучене Королівство), 24,7 % (617,37 млн євро) надійшло в країни єврозони [3].

Індустріалізація, урбанізація, зростаючі прямі закордонні інвестиції та технічні удосконалення є основними рушійними факторами розширення ринку.

Ключовими факторами, які стримують розвиток ринку, є непостійність у постачанні сировинних матеріалів, що перешкоджає зростанню ринку сировинних матеріалів, і неузгодженість цін, оскільки при виготовленні зварювальних матеріалів використовують сталевий і алюмінієвий прокат, графітовий і залізний порошки, порошки феросплавів, хімічних сполук і природних мінералів, а також інші сировинні матеріали. На додаток зміни правил торгівлі, відсутність балансу в постачаннях і вимоги екології, непостійність курсів валют, підвищені геополітичні загрози роблять свій вагомий внесок у флуктуацію цін на ці ресурси – все це суттєво негативно впливає на розвиток виробництва й вартість виготовлення зварювальних матеріалів, змушуючи виробників урізати розміри

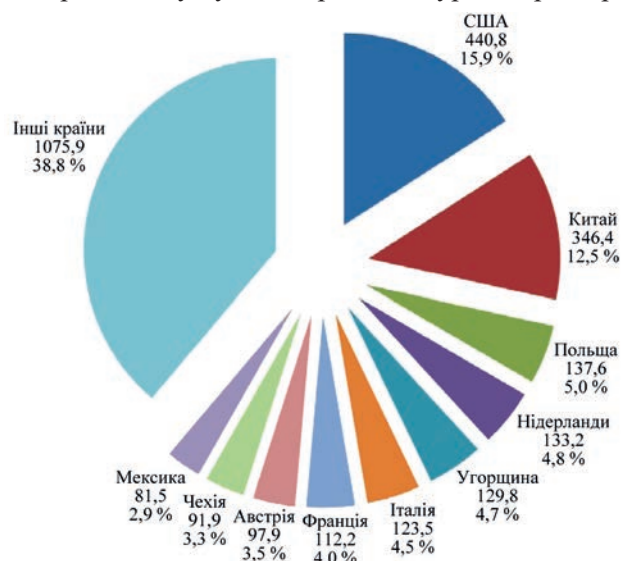


Рис. 2. Експорт зварювальних технологій компаній Німеччини (млн євро) у 2022 р.

прибутків, щоб залишатися конкурентоспроможними на світовому ринку.

Крім того, розвиток цієї галузі промисловості обмежується збільшенням числа нещасних випадків на виробництві через брак відповідної кваліфікації й компетенції зварників. Більшість учасників виставки відзначають, що галузі промисловості, які пов'язані з виробництвом зварювальних матеріалів, стикнулися з таким викликом, який став результатом масового виходу на пенсію досвідчених спеціалістів, що призвело до нестачі компетентних працівників. Від цього скрутного становища страждають в першу чергу такі галузі промисловості, як важке машинобудування, автомобілебудування і будівництво, які пов'язані з інтенсивним використанням зварювальних технологій. Нестача компетентних зварників також має наслідки в інших галузях промисловості. Як результат, ці обмежуючі фактори створюють виклики для виробництва зварювальних матеріалів і зварних конструкцій й обмежують зростання ринку.

Якщо розглянути розвиток регіональних ринків зварювальних матеріалів, то азійсько-тихоокеанський регіон утримував найбільшу частку і буде розширюватися швидкими темпами на прогнозований період завдяки присутності компаній розвинених країн, таких як КНР, Індія та Південна Корея. На додаток, розвитку цього регіонального ринку сприяє великий притік капіталу й високий рівень освоєння «розумних» технологій, особливо роботизованого зварювання.

Відповідно до даних досліджень фонду «India Brand Equity Foundation», провідні місцеві фірми, які зайняті у високотехнологічних виробничих, будівельних галузях промисловості, інвестують за межами Індії, що також буде підтримувати зростання ринку в майбутньому. Наприклад, компанія «Larson & Turbo» постійно інвестує у виробництво енергетичного обладнання, а компанія «Bharat Heavy Electrical Limited» виходить зі своєю продукцією на ринки Сирії й В'єтнаму.

Прогнозується, що після азійсько-тихоокеанського регіону Північна Америка буде зберігати першість на світовому ринку на цей період. Північно-Американські компанії є не тільки першопрохідниками у запровадженні нових технологічних рішень, але вони й здійснюють величезні інвестиції в цьому конкретно регіоні у роботи по дослідженням і розробці. Все це прискорює темпи продаж зварювальних матеріалів на ринках країн по всій Північній Америці. На додаток, більшість світових гравців продовжують засновувати свої виробничі потужності у країнах північноамериканського регіону, перетворюючи його на один із провідних виробничих хабів продукції, і це також допомагає зростанню ринку.

Вірогідно, що Європа буде демонструвати постійне розширення ринку на прогнозований період завдяки вже існуючому розвиненому ринку для постачальників зварювальних матеріалів. Європейський Союз вживає посилені заходи відносно попередження забруднення по всій Європі, що призводить до розширення виробництва продукції, дружньої до навколишнього середовища. Це змушує виробників зварювальних матеріалів виготовляти екологічну продукцію, яка може зменшити рівень забруднення в найближчому майбутньому. Це також позитивно впливає на збільшення частки європейських компаній на світовому ринку.

Провідні гравці на ринку зварювальних матеріалів концентрують свої зусилля на професійному навчанні зварників для створення або підкріплення свого потужного бренду. Різноманітні об'єднання по проблемам зварювання та урядові органи співпрацюють з ключовими виробниками для навчання зварників правильному і ефективному застосуванню сучасних технологій. Наприклад, компанія «Weld Australia» співпрацює з федеральним урядом та урядами штатів Австралії, а також різними технічними освітніми інститутами та закладами по підвищенню кваліфікації (Technical and Further Education) по всій країні для навчання нових зварників та підвищення кваліфікації працюючих зварників.

Виробники також намагаються покращити свої позиції на локальних ринках, що створюються по всьому азійсько-тихоокеанському регіону за рахунок зміцнення ланцюгів постачання, а також посилення безпосередніх контактів зі споживачами для виходу на світовий ринок. Диверсифікація продукції, що випускається, впровадження новітнього обладнання та зварювальних матеріалів є стратегіями органічного розвитку гравців ринку, що оперують також на глобальному рівні.

Розвиток основних сегментів ринку зварювальних матеріалів. Виходячи з типу зварювального матеріалу, ринок класифікують на драти суцільного перетину, порошкові драти, покриті електроди для ручного дугового зварювання, драти і флюси для зварювання під флюсом (рис. 3).

Сегмент ринку дратів суцільного перетину зберігає найбільшу частку завдяки розширенню їх використання в різноманітних сферах. Оцінюється, що цей сегмент буде домінувати на ринку зварювальних матеріалів. Драти суцільного перетину широко застосовуються в багатьох галузях промисловості кінцевими споживачами для дугового зварювання в інертних газах. Завдяки високій продуктивності наплавлення, ефективності виконання робіт, можливості одержання чистих і міцних зварних швів очікується, що на такі драти будуть звертати уваги нові учасники ринку в першу чергу. На сьогоднішній день

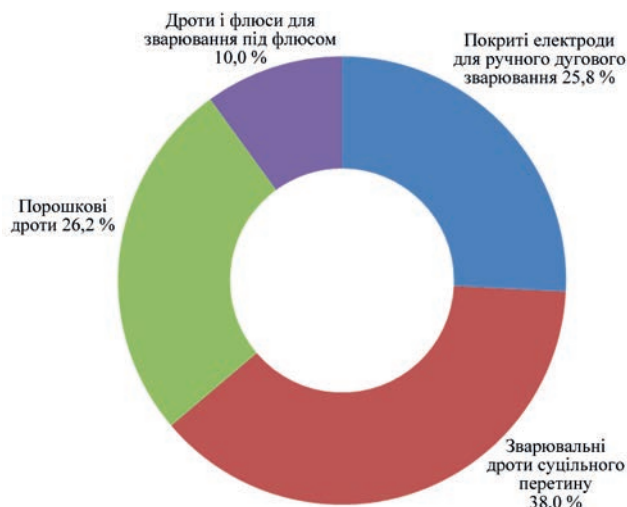


Рис. 3. Частки ринку зварювальних матеріалів відповідно до їх типу у 2022 р. [1]

промисловість зварювальних матеріалів фокусується на простих і ефективних по вартості зварювальних рішеннях для того, щоб захистити зварювані деталі від впливу зовнішнього середовища. Для захисту від окислення низьковуглецевий дріт суцільного перетину вкривають міддю, що покращує провідність, але, нажаль, мідь не є бажаною при виконанні окремих типів зварних конструкцій. Тому зростають потреби в так названих полірованих дротах суцільного перетину (дроти з ультранизким вмістом шкідливих домішок і високим ступенем очищення поверхні). Такі дроти мають суттєві переваги при застосуванні у роботизованому зварюванні, однак «поліровані» дроти досі не дуже широко представлені на ринку. Компанія «ESAB» зберігає першість в пропозиції таких дротів, і лише невелика кількість компаній спроможні пропонувати такі дроти такої ж якості, зокрема «ITALFIL».

Тут слід відзначити хороші перспективи застосування покриття дроту без міді для забезпечення кращого його подавання та захисту від несприятливого впливу навколишнього середовища. Тайванська компанія «Kuang Tai Metal Industrial Co., Ltd» пропонує дріт з покриттям без міді, що дозволяє суттєво знизити зношення контактного наконечника та покращити стабільність подавання дроту (рис. 4).

Експерти вважають, що, завдячуючи потребам багатьох галузей промисловості, сегмент ринку порошкових дротів буде досить швидко розвиватися. Досягнення у покращенні якості порошкових дротів дають їм все більше переваг при використанні в будівництві та суднобудівній галузі промисловості, збільшуючи потреби в цих дротах в усьому світі.

Оскільки покриті електроди для ручного дугового зварювання, які призначені переважно для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей, мають невисоку вартість при широкому

діапазоні застосування в галузях промисловості, вони все ще мають переваги при виборі зварювального матеріалу.

Спосіб дугового зварювання під флюсом дозволяє одержувати вироби, які витримують високі температури, є стійкими до корозії, а також при з'єднанні матеріалів великої товщини. Завдяки цьому прогнозують розширення застосування дугового зварювання під флюсом і, відповідно, збільшення потреб у матеріалах для реалізації цього процесу.

Цифрові технології у зварювальному виробництві. Застосування дугового зварювання одержує помітне зростання завдяки впровадженню «розумних» заводів і зварювальної техніки, що базується на досягненнях четвертої промислової революції (або «Industry 4.0»). При цьому ринок далі розділяють на категорії: дугове зварювання, контактне зварювання, кисневе зварювання, зварювання в твердому стані та інші технології (лазерне та електронно-променеве зварювання).

Четверта промислова революція визначається як злиття інтелектуальних цифрових технологій у виробництві й промислових процесах. Вона базується на використанні ряду цифрових технологій, які включають промислову мережу Інтернету речей, штучний інтелект, системи обробки великих масивів даних Big Data, робототехніку і системи автоматизації.

У цьому ключі запропоноване компанією «ESAB AB» програмне забезпечення «InduSuite» відкриває цифровий хмарний застосунок для відслідковування зварних швів на основі централізованої платформи, що працює в режимі online. Цей застосунок комбінує функції управління проектом і відслідковування зварних швів, що дає можливість за допомогою звичайного доступу до Інтернету одержувати відомості про поточний стан виконання проекту, частку виконаних зварних швів, обсяги дефектів у зварних швах, кількість зварних з'єднань, що потребують виправлення. Основні функції включають можливість безпосереднього запису зварювальної сесії від джерела живлення, що дозволяє негайно порівняти із регламентом процедури зварювання. Якщо режими зварювання виходять за регламентовані процедурою межі, система негайно повідомляє споживача, даючи йому можливість невідкладно почати коригувати виконання зварного з'єднання й швидше визначити причину виникнення проблеми. Таке програмне забезпечення суттєво допомагає компаніям, які потребують всебічного документування дотримання вимог відслідковуваності й підзвітності, вирішувати завдання керування проектом з більшою ефективністю й точністю, виключаючи суб'єктивні помилки і навмисні викривлен-

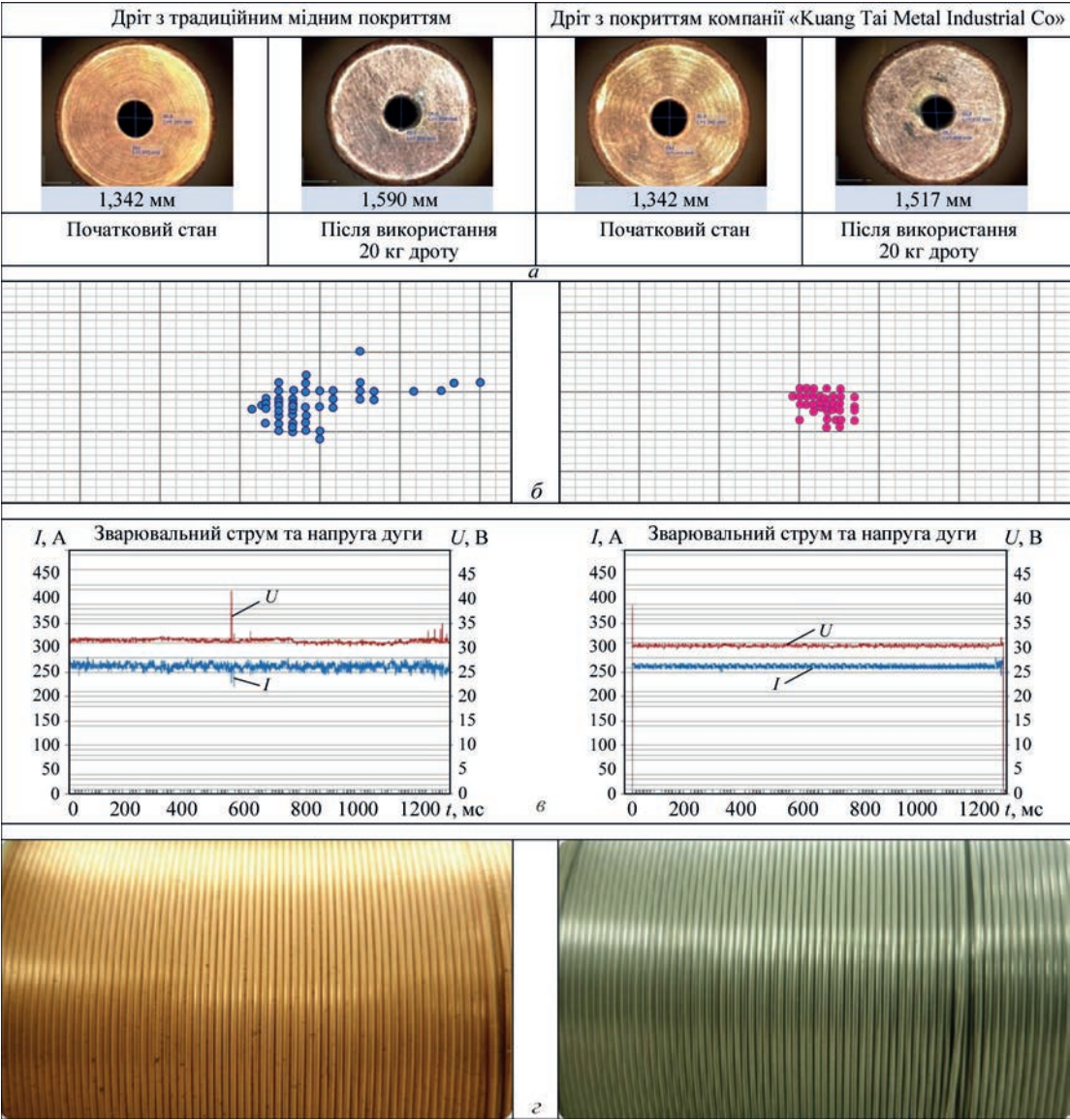


Рис. 4. Дріт з покриттям без міді компанії «Kuang Tai Metal Industrial Co.» у порівнянні з дротом з традиційним мідним покриттям: а – зношення контактної наконечника; б – точність подавання кінця дроту; в – стабільність подавання дроту; г – зовнішній вигляд дроту після витримки протягом 48 год при температурі 45 °С та відносній вологості 90 %

ня даних. Програмне забезпечення «WeldCloud Assembly» являє собою цілісну платформу, яка особливо корисна при виготовленні металоконструкцій для застосування в енергетичній, нафтогазовій галузях, суднобудуванні, та інших галузях промисловості, де необхідно забезпечити надійну відслідковуваність зварних швів. Програмне забезпечення зберігає і надсилає всю інформацію про кожен зварний шов безпосередньо до електронної хмари, з якої її можна дістати за допомогою комп'ютера, планшета чи смартфона. Передача інформації безпосередньо з місця виконання зварювальних робіт гарантує її достовірність і відсутність помилок і викривлень.

Програмне забезпечення «WeldCloud Assembly» також допомагає визначити вузькі місця виробничого процесу шляхом відслідковування етапів виготовлення зварних конструкцій. Наприклад, дозволяючи моніторити кількість зварних з'єднань, які потребують на даний момент інспекції неруйнівними методами контролю. Крім того, «WeldCloud Assembly» дозволяє споживачам відслідковувати всі проекти з кожним підрядником, гарантуючи їх якість і відповідність вимогам та надаючи друковані версії звітів про результати інспекції зварних швів, а також доступ до статистичних даних стосовно з'єднань, деталей, зварних швів, обсягів виправлення дефектів, журналу аудиту та повному обліку всіх типів документів. Інформація може подаватися в зручному для споживача вигляді, використовуючи відповідні графіки й діаграми. Кольорове графічне подання інформації дозволяє зручніше відстежувати кожен зварний шов в режимі реального часу, позначаючи, наприклад, зеленим шви, що повністю відповідають вимогам, і червоним шви, що виконані з відхиленнями режимів зварювання від заданих.

Споживач самостійно може налаштовувати інспекційний сегмент програмного забезпечення «WeldCloud Assembly» на свої потреби, наприклад, візуальний, радіографічний, ультразвуковий чи інший тип контролю), статус тестування (запланований чи виконаний), всі прийнятні та неприйнятні результати випробувань, місця знаходження дефектів (основний метал, розкриття країв, зварний шов чи зона термічного впливу).

Цифрові рішення «InduSuite», що базуються на хмарних технологіях, включають такі застосунки як «WeldCloud Productivity», «WeldCloud Fleet», «WeldCloud Notes» і «CutCloud» для аналізу даних різання. Встановлені застосунки програмного забезпечення «InduSuite» включають програмне забезпечення для викройки листових матеріалів COLUMBUS CAD/CAM для різання і обробки країв, програмне забезпечення OTCPUZ, створене в співробітництві з компанією «Alma» для програмування робіт в режимі «offline», а також «EasyNest Online», що теж базується на хмарних технологіях для викройки листових матеріалів. Застосунки «InduSuite» є незалежними від брендів, таким чином вони поєднують машини і процеси у галузях зварювання, різання і роботизованого обладнання.

Застосунки «InduSuite» не потребують від споживача попереднього IT досвіду. Їх особливості, що базуються на хмарних технологіях, та інтуїтивний інтерфейс дозволяють, як стверджують розробники, користуватися всіма їх функціями вже через годину навчання. Вони працюють на загальній платформі з безпекою і надійною хмарною архітектурою «Microsoft Azure» [indusuite.com].

Серед цифрових технологій, що пропонує компанія «voestalpine Boehler Welding», слід звернути увагу на пакет програмного забезпечення «weldNet®», який дає користувачу швидкий і надійний доступ до даних та інформації для більш ефективної роботи, а менеджер матеріалів «weldNet®» «MATERIAL MANAGER» надає доступ до більш ніж 35 тис. основних матеріалів, рекомендованих присадкових металів і зварювальних процедур; до назв більш як 2200 стандартів DIN, EN, ISO і AWS; а також до розширеного портфоліо присадкових металів компанії «voestalpine Boehler Welding». Зварювальний калькулятор «weldNet®» «WELDING CALCULATOR» дозволяє обчислити час охолодження, температуру підігріву, вирахувати потрібну кількість зварювального матеріалу або присадкового металу та багато чого ще іншого. Конфігуратор обладнання «weldNet®» «EQUIPMENT CONFIGURATOR» допомагає зібрати зварювальну машину для власних потреб з усіма необхідними компонентами індивідуально у будь-який час. Конфігурація проводиться,

базуючись на чистих параметрах або повністю вільному пошуку продукту. При цьому досконало комбінуються різні компоненти, тобто можна покластися на те, що буде підібрана оптимальна і найбільш підходяща комбінація описаних компонентів. Всі відібрані індивідуальні компоненти зводяться у лист замовлення, який розміщується в електронному магазині компанії. Менеджер процесу «weldNet®» «PROCESS MANAGER» дозволяє керувати зварювальними проєктами простим способом і забезпечує документування відстежуваних даних зварного шва. Він забезпечує надійний і безпечний менеджмент даних зварного шва, надає інтуїтивні панелі для швидкої навігації та моніторингу в режимі реального часу декількох зварювальних станцій, надає простий менеджмент завдань і проєктів зварювання для підтримки виробничого планування.

Що стосується тренування і навчання зварників, компанія «FRONIUS International» демонструвала новий навчальний симулятор зварювання «Welducation», який переводить тренування зварників повністю на новий рівень. Симулятор інтегрований в корпус стандартної зварювальної системи з реальними зварювальними пальниками і надреальним візуальним супроводом завдяки розширеній реальності AR (augmented reality). Використовуючи симулятор, зварники можуть навчатися, тренуватися та зміцнювати свою майстерність крок за кроком в реалістичних умовах без будь-якого ризику для здоров'я та для економії матеріалів і коштів. Пов'язана з цим симулятором платформа «Welducation Campus» дозволяє зварникам проходити всебічне тренування із віртуальними завданнями, вивченням теорії, а також створювати курси і керувати ними. Компанія забезпечує зварювальні рішення при відсутності у замовника необхідної майстерності чи задля ефективного використання ресурсів.

На виставці компанія «Fronius» сфокусувалася на головних русійних силах зварювальної технології. Вимоги щодо якості зростають в усіх галузях промисловості, однак спеціалістів з необхідним рівнем кваліфікації дуже небагато та їх важко знайти. Ефективне використання ресурсів також надзвичайно важливе з економічної та екологічної перспективи, особливо це стосується використання присадкових матеріалів, газів та енергії. Це означає, що важливо уникати виробничих помилок і затратних з точки зору часу виконання робіт по їх виправленню. У зв'язку з цим компанія «Fronius» презентувала елементи своєї системи досконалого зварювання «Fronius Perfect Welding».

Система «WeldCube Navigator» дає змогу реалізувати стандартизований зварювальний процес. Разом з відмінним тренуванням, стандартизація може

допомогти забезпечити якість від першого до останнього компонента. Система «WeldCube Navigator» є початком запуску цифрового інструменту зі стандартизованими робочими інструкціями і спрощує передачу знань. При виконанні свого завдання зварники направляються крок за кроком за допомогою екранних інструкцій, що дозволяє не тільки підвищити якість зварних швів, а також робить освоєння техніки і тренування легшим і швидшим.

Досягнення ключових гравців ринку зварювальних матеріалів. Вважають, що ключовими компаніями на світовому ринку, є наступні: «Lincoln Electric» (США), «KOBELCO STEEL», Ltd (Японія), «ESAB» (США), «CS HOLDINGS CO., LTD» (Корея), «Hyundai Welding Co., Ltd» (США), «Panasonic Corporation» (США), «Fronius International GmbH» (Австрія), «RME MIDDLE EAST» (Об'єднані Арабські Емірати), «Voestalpine BOEHLER Edelstahl GmbH» (Австрія), «Tianjin Golden Bridge Welding Materials Group International Trading Co., Ltd» (КНР). Усі вони намагаються поєднати у пропозиції користувачу не тільки зварювальні матеріали, але й технологію їх застосування та устаткування для ефективною реалізації такої технології.

Ключові розробки останнього часу в галузі виробництва зварювальних матеріалів за версією сайту www.fortunebusinessinsights.com є наступні:

Компанія «Miller Electric Mfg. LLC», яка, як вважають, є однією з провідних виробників передового зварювального обладнання і зварювальних матеріалів, нещодавно висунула на ринок свою нову колаборативну зварювальну систему «Copilot collaborative welding system». Ця система дозволяє зварнику досягати кращої якості зварювання і оптимізувати використання зварювальних матеріалів, що дозволяє легше і повніше задовольняти розширені вимоги, що висувуються до зварного виробу. Також компанія анонсувала початок своєї співпраці з Національним центром з освіти і досліджень у будівництві NCCER (National Center for Construction Education & Research). Очікується, що їх спільні зусилля забезпечать Центр NCCER засобами навчання зварюванню на рівнях 1 і 2 за рахунок інтеграції зварювальної системи розширеної реальності компанії «Miller Electric Mfg. LLC».

Компанія «Lincoln Electric», яка залучена у розробку, виготовлення й постачання зварювального обладнання та зварювальних матеріалів по всьому світу, розширила різноманітність своєї продукції, висунувши на ринок інноваційне рішення в галузі порошкових дротів «Hyperfill», а також випустила на ринок свою новітню розробку – зварювальну машину «Power MIG 215 MPi Multi-Process Welder», яка спроектована для досягнення еконо-

мічних переваг і відзначається в експлуатації надійністю конструкції.

Компанія «ESAB Welding» випустила на ринок нові зварювальні машини «Cored Wire Welders/EM 210 MIG» для зварювання порошковим дротом і «EMP 210 MIG/TIG Welders/Sticks» для зварювання неплавким електродом або штучними електродами. Ці зварювальні джерела живлення інверторного типу є достатньо компактними і забезпечують живлення дуги професійного рівня, а також продуктивність, що необхідна для умов виконання ремонтного й відновлювального зварювання деталей легкових і вантажних автомобілів, виконання невеликих обсягів виробничого зварювання і будівництва, виготовлення обладнання для нагрівання, вентиляція і кондиціювання повітря.

Слід відзначити, що більшість провідних компаній виробників зварювальних матеріалів, продовжуючи пропонувати якнайширший спектр зварювальних матеріалів для різноманітних галузей застосування, все більше просувають комплексні рішення, що поєднують зварювальні матеріали, технологію їх ефективного застосування для конкретних завдань конструкційних з'єднань разом з відповідним устаткуванням для реалізації такої технології. Такі рішення, як правило, орієнтовані на використання цифрових технологій для моніторингу і документування процесу утворення зварного з'єднання.

Переваги дугового зварювання, особливо роботизованого дугового зварювання, в автомобілебудуванні та важкому машинобудуванні сприяють збільшенню обсягів продаж відповідних зварювальних матеріалів на прогнозований період. Нові процеси дозволяють одержувати з'єднання з кращими властивостями, забезпечуючи більшу безпеку, меншу вагу, вищу екологічність зварних конструкцій.

Так, компанія «Hyundai Welding» презентувала таку свою інноваційну продукцію, як перший у світі дріт суцільного перетину SM70-MT, який є дружнім до електрофорезного покриття. Електрофорезне покриття – це добре визнана технологія в автомобілебудівній галузі промисловості для захисту деталей автомобіля від корозії, але її застосування на зварних компонентах може бути проблематичним через погане прилипання на силікатні острівки, що залишаються позаду зварних швів, виконаних газозахисним зварюванням. Місця нестачі твердого захисту електрофорезним покриттям пізніше можуть діяти як ініціатори розвитку іржі, коли транспортний засіб буде експлуатуватися в умовах корозійного середовища, такого як вологість, зміни температур, морський вітер, застосування солей для боротьби із зледенінням. Видалення силікатів є ефективним

засобом, але воно суттєво підвищує вартість виробничих ліній і тому не є бажаним. Відповіддю компанії «Hyundai Welding» на цей виклик стала розробка першого в світі дроту суцільного перетину SM70-MT, який забезпечує ультранизьке утворення шлаку і є дружнім до електрофорезного покриття. Особливості цього дроту полягають у формуванні ультранизької кількості силікатів і дозволяє наносити електрофорезне покриття без післязварювального чищення поверхні зварного шва. Після екстенсивного випробування (45 днів) по стандарту GMW 15357 зразки зварного шва оцінювалися на рівні 10/10, ніяких ознак корозії. Дріт SM70-MT забезпечує зварювання практично бризок електродного металу разом з відмінною спроможністю перекриття зазору – дві інших суттєвих вимоги виробників автомобілів.

Компанія «Panasonic Connect Europe» презентувала устаткування для автоматизованого дугового зварювання порошковим дротом і дротом суцільного перетину, ручного дугового зварювання, зварювання пульсуючою дугою, лазерного зварювання й різання, устаткування для знімання, контролю й обробки даних параметрів процесу зварювання й обробки, ручних та інших приладів для вимірювання параметрів дугового зварювання (сили струму, напруги дуги, швидкості подавання електродного дроту, витрат захисного газу, швидкості зварювання, тепловкладення на одиницю довжини зварного шва), систем слідкування для дугового зварювання, вимірювання часових і частотних показників, систем навчання й тренування, надання консультацій, систем обробки даних і програмного забезпечення. Серед таких рішень пропонується «все в одному» рішення у вигляді роботизованої інтегральної лазерної системи (LAPRISS), обладнаної DDL осцилятором ультрависокої яскравості фірми «Panasonic» для автоматичного лазерного зварювання, а також систему заміни електродного дроту для використання одного пальника з двома різними на вибір зварника електродними дротами, зварювальну систему PA-TT-2PD для стандартної системи «PerformArc», де реалізуються процеси TAWERS (The Arc Welding Robotic System – технологія роботизованого зварювання, в якій робот-маніпулятор і контролер об'єднані з джерелом живлення зварювального струму і сервоприводом подавання дроту в один блок) супер-накладання імпульсів та імпульсів високої щільності при газозахисному дуговому зварюванні, відповідні програмне забезпечення й устаткування для реалізації вискоефективних процесів, а також системи TAWERS WG3 високошвидкісного зварювання неплавким електродом з високочастотним запалюванням дуги, нові

роботи серій TS і HH з діаметром робочої зони 0,8...3,0 м, нове інверторне імпульсне джерело живлення VP-400 для ручного дугового зварювання покритими електродами і автоматичного газозахисного зварювання.

Компанія «ESAB AB» презентувала свої розробки в галузі підводного різання і зварювання, системи CAD, CAM, CAQ, CIM і CAP, а також програмне забезпечення і системи обробки даних.

Серед інновацій компанії «FRONIUS International» слід відзначити системи зварювання неплавким електродом з холодним присадковим дротом (TIG cold-wire), які вже доступні в системі «iWave» компанії «Fronius». Новаторська інновація полягає в інтелектуальному управлінні. Новий запатентований зварювальний пакет динамічного подавання дроту «TIG DynamicWire» дозволяє навіть новачку легко і просто одержувати досконалі зварні шви при зварюванні неплавким електродом завдяки динамічному управлінню, яке завжди підлаштовує необхідну швидкість зварювання, тобто процес адаптується під зварника, а не під що-небудь ще поряд. Ринкова інновація – це активне управління подаванням електродного дроту. Інноваційна перевага пакета «DynamicWire» компанії «Fronius» у порівнянні з неперервним подаванням дроту полягає у її автоматичному саморегулюванні. Зварювальна система активно налаштовує швидкість подавання дроту відповідно до ведення зварювального процесу, положення пальника, сили струму, навіть автоматично компенсує допуски схемних компонентів до 30 %, і в результаті одержують досконалий зварний шов. Компанія також презентувала групи продуктів стосовно адитивного виготовлення деталей (тривимірний друк за допомогою зварювальної машини, який відкриває повністю нові можливості в цій галузі), автоматизації ручного дугового зварювання, імпульсно-дугового зварювання, багатодротове зварювання, газозахисне зварювання, зварювання неплавким електродом, зварювання чорних і кольорових металів, захист зварників і операторів.

Рішення «Cobot» компанії «Fronius» є ефективними з точки зору коштів навіть для партій, починаючи з одного. Інша можливість у боротьбі проти браку майстерності полягає у вивільненні робітників високої кваліфікації від рутинної роботи так, щоб вони могли сфокусуватися на більш вимогливих завданнях. Зварювальна комірка CWC-S cobot полегшує перший крок у напрямку автоматизації.

Більшість виробників зварюваних матеріалів мають власні науково-дослідні і випробувальні центри або орієнтуються на тісну співпрацю з технічними університетами.

Так, турецька компанія «GEDİK Welding» разом з університетом Стамбулу проводить науково-дослідні роботи у галузі адитивного металевих виробництва, зокрема, в галузі адитивного виробництва за допомогою роботизованого дугового зварювання електродним дротом WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Компанія «GEDİK Welding» пропонує нове покоління присадкових дротів суцільного перетину і порошкових дротів з металевим типом осердя для інноваційних та багатообіцяючих тривимірних WAAM застосунків, в яких можуть одночасно існувати вимоги низької й високої міцності. Присадкові матеріали на основі високолегованих сталей, таких як нержавіючі сталі, алюмінієвих та бронзових сплавів можуть постачатися разом з відповідною технологією процесу і специфікацією матеріалу, які конструктори і замовники можуть відразу ж реалізувати для своїх WAAM застосунків, використовуючи комірку «GeKa WAAM Cell», яка включає зварювальний робот, джерело живлення зварювальної дуги, позиціонер разом з відповідним програмним забезпеченням і спеціальними електродними дротами. Фокусуючись на інноваціях, компанія «GEDİK Welding» розробляє рішення для замовника, які базуються на потребах кожного сегменту галузі промисловості, щоб гарантувати досягнення найкращих результатів замовникам, а виробничі потужності компанії дозволяють легко постачати налаштовану під замовника зварювальну продукцію, «зшити» на замовлення, щоб відповідати різноманітним потребам клієнта.

На сьогодні компанія «Welding Alloys» пропонує найширший у світі діапазон передових зварювальних матеріалів для наплавлення, зміцнюючого наплавлення, обслуговування, відновлення форми, термічного наплення, з'єднання і ремонту. Цей діапазон включає зварювальні дроти для низько-, середньо- і високолегованого зміцнюючого наплавлення, виготовлення деталей з низьковуглецевої і нержавіючої сталі, дроти на основі нікелю і кобальту. На додаток до порошкових дротів, пропонуються зварювальні дроти суцільного перетину, алюмінієві зварювальні дроти, прутки для дугових процесів неплавким електродом, трубчаті й покриті електроди. Компанія має експертів по всьому світу, які можуть допомогти замовнику вибрати правильну продукцію відповідно до їх вимог. Також компанія виробляє зварювальне обладнання для професійного застосування у сферах зміцнюючого наплавлення, наплавлення, відновлення форми і з'єднання. Зварювальні машини, які пропонує компанія, здатні виконувати складні і точні зварювальні шаблони завдяки легкопрограмованій технології управління пальником D3 і

підвіскою D3. Скрізь, де замовнику потрібно відремонтувати устаткування відповідального призначення, завдання вирішується застосуванням гнучкого портативного обладнання або спеціально налаштованої на потреби замовника машини для специфічних сфер застосування.

Вирішення проблем безпеки і захисту довкілля. Стосовно вирішення екологічних проблем компанія «voestalpine Boehler Welding» запропонувала так звану створену на замовлення захищеність («Tailor-Made Protectivity™»), що гарантує оптимальну комбінацію «захисту» і «продуктивності» за рахунок інноваційних рішень під конкретні потреби замовника.

Тут слід відзначити презентовану компанією революційну повністю замкнуту комірку зварювального робота «CO-BRO GUARD™», що включає зварювальні каретки «railRunner», «wheelRunner» і «pipeRunner», систему роботизованого зварювання «The Perfect Weld Seam» («Досконалий зварний шов»), зварювальне обладнання у комбінації з нержавіючим присадковим металом (були продемонстровані наживо при дуговому зварюванні неплавким електродом і ручному дуговому зварюванні покритими електродами) разом з системою «The Perfect Weld Seam», а також зварювальне обладнання у комбінації з високоміцним дротом суцільного перетину і порошковим дротом разом з системою «The Perfect Weld Seam». Компанія також презентувала нову лінійку порошкових дротів «GUARD» для забезпечення безпеки і здоров'я зварника, разом з програмними рішеннями «weldNet®» для покращення управління якістю і документування зварювального процесу, віртуальний тур по виробничому цеху «voestalpine Bohler Welding» з використанням технологій віртуальної реальності.

Роботизована зварювальна комірка «CO-BRO GUARD™» забезпечує гнучкість, простоту використання, доступність, найкращі зварювальні характеристики, максимальний захист здоров'я, безпеку і захист навколишнього середовища (рис. 5).

Нові зварювальні каретки «railRunner», «wheelRunner» і «pipeRunner» забезпечують мак-



Рис. 5. Роботизована зварювальна комірка «CO-BRO GUARD™» компанії «voestalpine Boehler Welding»

симальну продуктивність, повний контроль (зварювальний процес і переміщення контролюються через один інтерфейс, всі параметри контролюються і програмуються в цифровому виді для забезпечення максимальної точності, відтворюваності та якості). Вони спроектовані для зварювання з найкращою якістю на прямих і вигнутих поверхнях з максимальним робочим циклом. Максимальний рівень безпеки забезпечується низьковольтним джерелом живлення в робочій зоні без необхідності використання батарей.

Пропонується повний комплект зварювального рішення в ідеальній комбінації: джерело живлення зварювальної дуги, механізм подавання дроту, інтерфейс, пальник, допоміжне приладдя і присадкові метали. Каретки сумісні з усіма комерційними брендами роботів.

Компанія «voestalpine Bohler Welding» створила серію продукції, яка не тільки більш безпечна для зварника, але також реалізує систему «The Perfect Weld Seam». Порошкові дроти серії «GUARD»: «diamondspark GUARD», розроблені для зварювання низьковуглецевої сталі металоконструкцій загального призначення, металоконструкцій на суднобудівних верфях, забезпечують низьке виділення сполук Mn у зварювальний аерозоль; «FOXcore GUARD», призначені для зварювання високолегованих CrNi сталей і забезпечують низьке виділення Cr(VI). Порошкові дроти «diamondspark GUARD» і «FOXcore GUARD» допомагають захистити робоче місце зварника, суттєво зменшуючи виділення марганцю і шестивалентного хрому в зварювальний аерозоль.

При використанні порошкового дроту diamondspark GUARD 420 виділення сполук Mn у зварювальний аерозоль зменшується на 60 %, якщо порівнювати з вальцьованим порошковим дротом з металевим типом осердя, на 45 %, якщо порівнювати з нелегованим дротом суцільного перетину ER70S-6 і на 70 %, якщо порівнюва-

ти із типовим вальцьованим порошковим дротом (рис. 6, а). При використанні порошкового дроту FOXcore GUARD 316L-T1 виділення Cr (VI) у зварювальний аерозоль зменшується на 95 %, якщо порівнювати зі стандартним порошковим дротом 316L-T1 (рис. 6, б).

Для ефективної реалізації процесів MIG/MAG і забезпечення вирішення екологічних проблем важливе значення має правильне поєднання присадкового зварювального матеріалу та захисного газу належного складу. Компанія «Messer», яка є однією з найбільших приватних компаній-постачальників газових сумішей на світовому рівні, пропонує спеціальні газові суміші не тільки для медичних і науково-дослідних сфер застосувань, а також постачає газові суміші для зварювального виробництва та 3D-друкування. Поряд зі своєю продукцією серій газових сумішей «Lasline», «Nitrocut» і «Oxycut» для лазерного різання запропонувала газові суміші серії «Ferroline» для зварювання і різання нелегованих і низьколегованих сталей, а також серії «Inoxline», оптимізовані для зварювання способами TSG, MIG і MAG високолегованих сталей та сплавів на основі нікелю серії «Aluline» для зварювання алюмінієвих сплавів і кольорових металів, серії «Addline» для застосування при 3D друкуванні металевих деталей. Такі спеціалізовані газові суміші дозволяють підвищити ефективність виробничого процесу і суттєво зменшити обсяги робіт по виправленню дефектів зварювання чи наплавлення.

Стосовно зварювання нелегованих і низьколегованих сталей дротом суцільного перетину в захисних газах, компанія продемонструвала ефективність застосування газових сумішей серії «Ferroline», зокрема, Ferroline C8 (ISO 14175-M20-ArC-8) та Ferroline C6 X1 (ISO 14175-M24-ArCO-6/1). Використання таких газових сумішей дозволяє покращити санітарно-гігієнічні показники зварювального процесу, суттєво

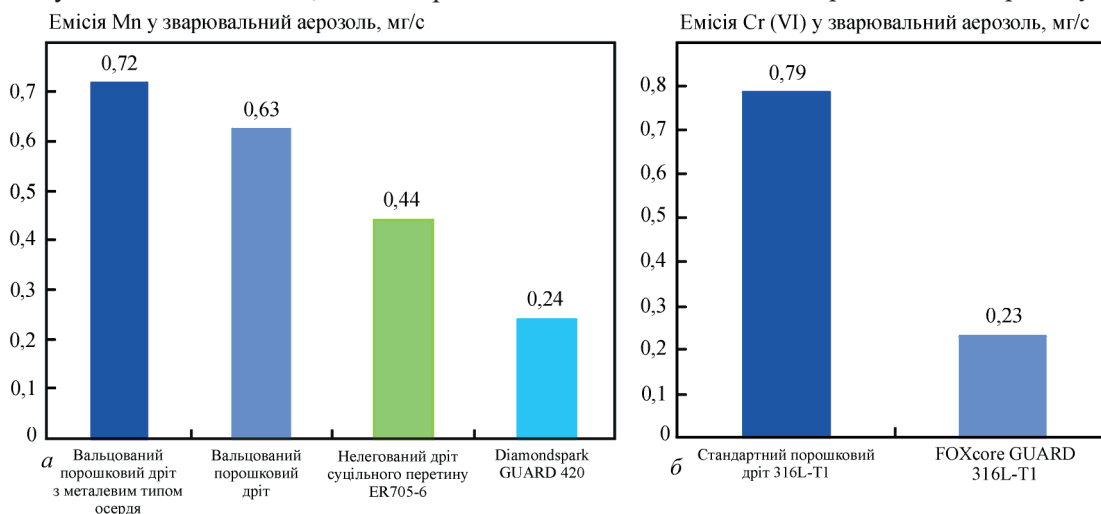


Рис. 6. Емісія Mn (а) і Cr(IV) (б) у зварювальний аерозоль при використанні електродних дротів різних типів

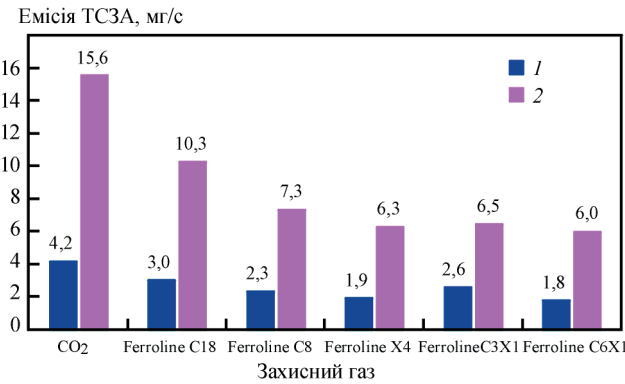


Рис. 7. Емісія ТСЗА при дуговому зварюванні дротом суцільного перетину в захисних газах різного складу: 1 – перенесення з короткими замиканнями і зварювання короткою дугою; 2 – струминне перенесення і зварювання довгою дугою

зниживши виділення твердої складової зварювального аерозолу (рис. 7) на всіх режимах зварювання (табл. 1).

Газові суміші Ferroline C18 і Ferroline C8 відповідно з 18 і 8 % CO₂, а також Ferroline X4 з 4 % O₂ – це випробувані стандартні газові суміші. Додавання кисню дозволяє ефективно знизити розбризкування, в той час як використання CO₂ може мати переваги при зварюванні в нестандартному положенні. Газові суміші Ferroline C8, а також Ferroline X4 демонструють тенденцію до використання газових сумішей з низькою активністю

(табл. 2). Зменшене формування шлаку та уникнення розбризкування можуть забезпечити вирішальні економічні переваги. Позитивний вторинний ефект полягає в тому, що при цьому помітно покращуються механічні та зварювально-технологічні показники. Газові суміші C12 X2 і C6 X1 забезпечують суттєве зниження розбризкування і більшу придатність до позапозиційного зварювання завдяки меншій частці O₂. Із зменшенням частки активного газового компоненту зменшується емісія димів, пилу і газів, таких як монооксид вуглецю.

Більша ефективність стосовно вартості означає більшу продуктивність наплавлення і менший обсяг ремонтних робіт після. Сучасні системи управління дугою дозволяють виконувати зварювання при більшій силі струму (до 500 А і навіть вище) дротами відповідного діаметру. Захисні гази з низькою реакційною здатністю, такі як Ferroline X4, дозволяють покращити показники стабільності таких зварювальних процесів і суттєво зменшити розбризкування електродного металу.

Відома діаграма демонструє широкі можливості в управлінні дуговими процесами для досягнення якісних та економічних переваг за рахунок використання належної комбінації присадкового матеріалу, режимів реалізації процесу

Таблиця 1. Режими зварювання в захисних газах дротом суцільного перетину

Захисний газ	Швидкість подавання дроту, м/хв		Напруга дуги, В		Сила зварювального струму, А	
	Зварювання короткою дугою	Зварювання довгою дугою	Зварювання короткою дугою	Зварювання довгою дугою	Зварювання короткою дугою	Зварювання довгою дугою
CO ₂	4,6	12,0	24,4	34,6	150	315
Ferroline C18 18 % CO ₂ , решта Ar	4,6	12,0	19,4	32	180	325
Ferroline C8 8 % CO ₂ , решта Ar	4,6	12,0	19,2	31,8	180	322
Ferroline X4 4% O ₂ , решта Ar	4,6	12,0	19,0	31,6	180	330
Ferroline C3 X1 3 % CO ₂ , 1 % O ₂ , решта Ar	4,6	12,0	19,2	31,7	178	327
Ferroline C6 X1 6 % CO ₂ , 1 % O ₂ , решта Ar	4,6	12,0	19,2	31,8	179	325

Таблиця 2. Захисні гази для процесів зварювання MAG компанії «Messer»

Серія газових сумішей Ferroline	Група відповідно ISO 14175	Склад в об'ємних частках, %			
		Ar	CO ₂	O ₂	He
Ferroline C8	M20	92	8	-	-
Ferroline C1 8	M21	82	18	-	-
Ferroline C25	M21	75	25	-	-
Ferroline X4	M22	96	-	4	-
Ferroline X8	M22	92	-	8	-
Ferroline C6 X1	M24	93	6	1	-
Ferroline C1 2 X2	M24	86	12	2	-
Ferroline C5 X5	M23	90	5	5	-
Ferroline He20 C8	M20	72	8	-	20
Диоксид вуглецю	C1	-	100	-	-

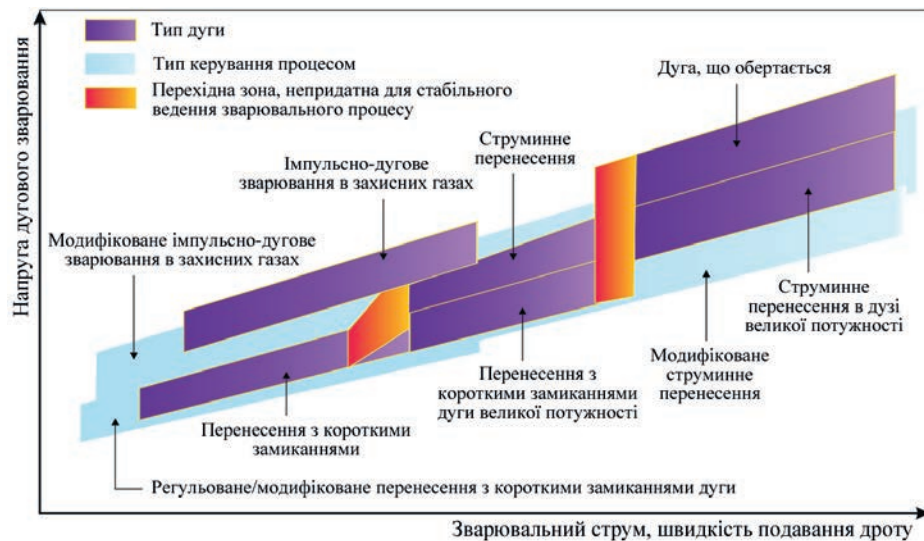


Рис. 8. Розширення можливостей керування дуговим процесом зварювання в захисних газах

та використання захисного газу відповідного складу (рис. 8).

Висновки

Більшість виробників зварювальних матеріалів приділяють особливу увагу сертифікації своєї продукції страховими агенціями, товариствами і організаціями, такими як Lloyds Register, Det Norske Veritas, Bureau Veritas, ABS, Germanischer Lloyd, Deutsche Bahn, Polish Ship Register Office.

Органічне поєднання досягнень інтелектуальних цифрових технологій зі зварювальним виробництвом в промислових процесах стає типовим для реалізації не тільки роботизованих й автоматизованих систем. Четверта промислова революція робить можливим створення «розумного» виробництва й націлена на підвищення його продуктивності, ефективності та гнучкості, відкриваючи можливості прийняття найбільш ефективних рішень і покращення орієнтації на споживача на всіх етапах виробництва, а також постачання сировини.

Всі рішення, що демонструвалися на виставці, орієнтуються на захист навколишнього середовища, здоров'я робітників та гарантування їх безпе-

ки. Багато уваги приділяється ергономіці, наприклад, при розробці зварювальних пальників нової якості, вибору ефективних систем видалення зварювального аерозолі, систем подавання свіжого повітря, а також захисного одягу та обладнання.

Всі провідні компанії-виробники зварювальних матеріалів на виставці презентували свою готовність і здатність пропонувати готові технологічні рішення відповідно специфічним вимогам споживача. Такі комплексні рішення включають технологію одержання надійного з'єднання деталей чи нанесення покриття, устаткування, зварювальні або присадкові матеріали для реалізації технології, що в поєднанні гарантує необхідні споживачу властивості виробу, а також технічний супровід.

Список літератури/References

1. The global welding consumables market is projected to grow from \$12.98 billion in 2023 to \$17.66 billion by 2030, at a CAGR of 4.5% (2023). <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/welding-consumables-market-101598>
2. Talmann, A. (2023). Schweißen und Schneiden 2022 – Starkes Wachstum bei Importen und Exporten. *Schweißen und Schneiden*, 75, 9, 648–663.
3. Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (o.J.): GENESIS-Online (<https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>).

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION OF ARC WELDING MATERIALS AT THE FAIR «SCHWEISSEN&SCHNEIDEN – 2023» IN ESSEN

S.Yu. Maksymov, A.A. Golyakevych, O.S. Kotelchuk

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

E-mail: maksimov@paton.kiev.ua

Based on analyzing the materials of the fair «Schweissen & Schneiden – 2023», held in Essen, Germany, as well as personal impressions from meetings with leading manufacturers and developers of materials for welding and cutting, the authors' generalized view of the modern trends in the development of the world market of welding materials for arc processes of fusion welding is given. 3 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: arc fusion welding, welding materials

Надійшла до редакції 21.02.2024
Отримано у переглянутому вигляді 06.03.2024
Прийнято 02.04.2024

ІЕЗ ім. Є.О. Патона: 1944–1960 роки

Виникнення і розвиток дугового зварювання у вуглекислому газі

У 1881 році М.М. Бенардос винайшов перший спосіб електродугового зварювання. У цьому способі зварювання вугільним електродом іони вуглецю у реакціях з киснем витісняли повітря із зони зварювання, запобігаючи окисленню та азотуванню металу. У першій половині ХХ ст. значну частину сталевих, чавунних і мідних виробів продовжували зварювати та ремонтувати за способом Бенардосу.

У 1936 р. співробітник ІЕЗ М.Г. Остапенко розробив спосіб дугового зварювання вугільним електродом у струмені вуглекислого газу та в атмосфері горіння паперового шнура. Завдяки газовому захисту можна було змінювати полярність та краще керувати тепловкладанням. М.Г. Остапенко писав: «Струмінь вуглекислого газу, обдуваючи розжарений вугільний електрод, утворює окис вуглецю, який не є окислювачем і тому може слугувати захисною атмосферою, що захищає розплавлений метал у зоні зварювання від навколишнього повітря». У 1944–1945 рр. в ІЕЗ досліджували процес зварювання з метою оптимізації технології (М.Г. Остапенко, І.В. Кірдо, В.К. Лебедев, А.І. Берзін).

М.Г. Остапенко застосував напівавтоматичне та автоматичне зварювання вугільною дугою у вуглекислому газі каністр, корпусів електричних конденсаторів, судин лужних акумуляторів, тонкостінних резервуарів, труб та ін. серійно виготовлених сталевих виробів.

Зварювання вугільним електродом у CO_2 продовжувало застосовуватися у 1950-х роках як механізована технологія при серійному виготовленні низки сталевих виробів.

Наприкінці 1930-х років в ІЕЗ В.І. Дятлов при створенні дугового зварювання сталі під шаром флюсу запропонував застосування електродних кремнемарганцевих дрітків. 14 лютого 1941 р. було затверджено спеціальний ГОСТ 178-41 для дроту: до 0,16 % С, 0,8...1,1 % Мп, 0,6...0,9 % Si, S та P

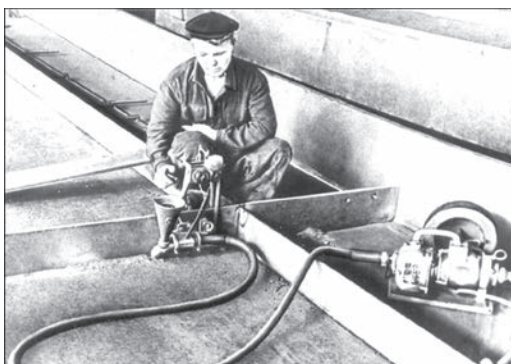
приблизно 0,04 %. Підвищений вміст кремнію та марганцю у дроті було введено для «розкислення» металу шва.

У 1952 р. К.В. Любавський та Н.М. Новожилов (ЦНДІТМаш) запропонували зварювання сталей цим дротом з використанням вуглекислого газу як газового захисту. Однак плавлення електродного дроту протікало нестабільно, супроводжувалося віялоподібним розбризкуванням.

Протягом 1940–1950 рр. в ІЕЗ було накопичено великий досвід дослідження процесів та впровадження дугового зварювання тонким дротом під флюсом. Б.Є. Патон, вивчаючи електроенергетичні характеристики процесів дугового зварювання, визначив умови зварювання з саморегулюванням плавлення електродного дроту, вимоги до елементів зварювального ланцюга.

Б.Є. Патон встановив, що: «Зварювальна дуга у вуглекислому газі більш еластична, ніж в аргоні, і має властивість саморегулювання при зростаючій вольт-амперній характеристиці, тому доцільно застосовувати джерела живлення постійного струму з жорсткою або зростаючою зовнішньою характеристикою. Великий інтерес представляє застосування зварювальних напівпровідникових випрямлячів та спеціальних зварювальних трансформаторів зі зворотними зв'язками та імпульсним запаленням дуги».

В ІЕЗ також встановили зв'язок між особливостями перенесення металу і характеристиками джерела живлення, такими як індуктивність ланцюга, реактивний опір короткого замикання, зміна магнітного потоку розмагнічування генератора, знайдені оптимальні співвідношення між напругою і струмом. Був розроблений процес, при якому для стабілізації процесу зварювання та зниження розбризкування були застосовані імпульси струму та джерела живлення з відповідними динамічними властивостями, розроблені в ІЕЗ (Б.Є. Патон, В.К. Лебедев, І.І. Заруба, А.Г. Потап'євський та ін.).



В ІЕЗ у 1957 р. було створено серійний зразок напівавтомата, у 1958 р. спроектовано спеціалізовані верстати-автомати. Почалося широке використання зварювання в CO_2 . Застосуванням спеціальних напівавтоматів вирішено проблему механізації та підвищення продуктивності виробництва об'ємних сталевих конструкцій у суднобудуванні, промисловому та цивільному будівництві, транспортній та військовій техніці та ін.

Статті про роботи в СРСР з дослідження і створення зварювання електродом, що плавить-

ся, в середовищі вуглекислого газу регулярно передруковували за кордоном і через короткий час американські фірми вже випускали апаратуру для цього виду зварювання. Незабаром зварювання у вуглекислому газі почали застосовувати у США, Швеції, Бельгії, Англії, Франції та інших країнах.

До кінця XX століття обсяг застосування зварювання в захисних газах склав: CO_2 – 90 %, Ar – 9 %, решта – суміші газів.

Створення електрошлакового зварювання

Одним із результатів комплексних досліджень, організованих Є.О. Патонем, було створення Г.З. Волошкевичем технології дугового автоматичного зварювання під флюсом вертикальних монтажних стиків. Для її здійснення розроблено обладнання для переміщення зварювальної головки та формуючих повзунів (В.Є. Патон, М.Д. Литвинчук та ін.).

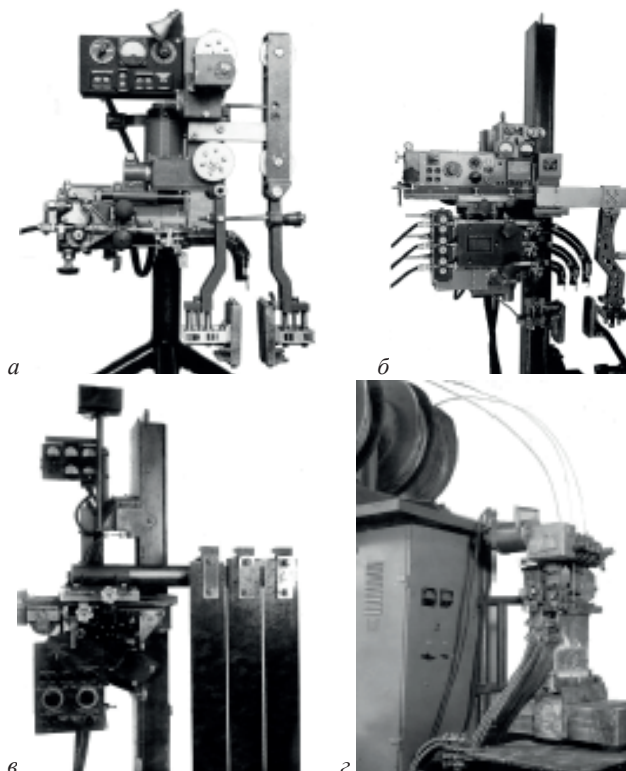
Однак при зварюванні стиків завтовшки понад 20 мм через глибоку шлакову ванну, перегрівання ванни та ряд інших факторів, дуговий процес ставав нестійким і навіть припинявся. У ході «боротьби» за стійкість дуги виявилось, що можна обійтися без неї! Створюються умови, коли електродний метал, флюс і кромки виробів, що сплавляються, одночасно плавляться за рахунок «джоулева» тепла, що виділяється при проходжен-

ні струму через рідкий шлак. У процесі затвердіння утворюється міцна сполука.

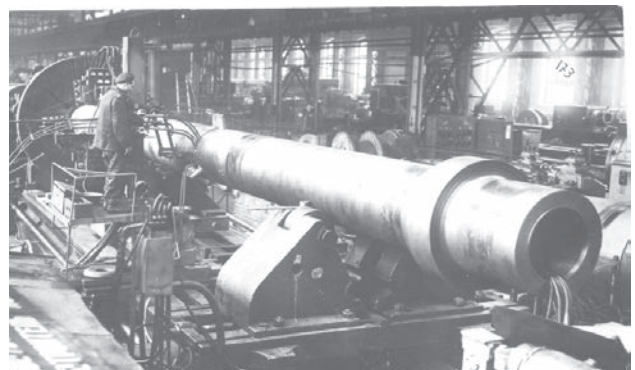
В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розгорнулися комплексні дослідження електрошлакових процесів, були розроблені принципи управління тепловою енергією, спеціалізовані апарати і джерела живлення, методи зниження деформацій і напружень. Так, у 1949 р. був створений новий вид зварювання – електрошлакове зварювання, розроблені обладнання і технологія зварювання за один прохід конструкцій практично необмеженої товщини.

Протягом наступних років розроблено технологію зварювання ЕШЗ дрютяними електродами, електродами великого перерізу і мундштуком, що плавиться, за один прохід.

Створення ЕШЗ призвело до корінної зміни стратегії розвитку важкого, енергетичного та транспортного машинобудування. Розділення заготовок дозволило надати окремим елементам більш раціональну форму та застосувати прогресивні технологічні процеси, наприклад, машинне формування. З'явилася реальна можливість виготовляти якісно нові вироби – унікальні за своєю потужністю агрегати в різних галузях важкого машинобудування. ЕШЗ лежить в основі створення нового класу масивних металевих конструкцій: зварювально-литих, зварювально-кованих та зварювально-прокатних без будівництва потужних металургійних підприємств. Крім ЕШЗ сталей різного призначення були розроблені технології і флюси для виготовлення товсто-



Апарати для ЕШЗ: а – А-612 (одноелектродний дріт); б – А-535 (триелектродні дроти); в – А-569 (пластинчасті електроди); г – А-645 (мундштук, що плавиться)



Електрошлакове зварювання вала Варваринської ГЕС, 1959 р.



В лабораторії електрошлакового зварювання ІЕЗ (зліва направо Г.З. Волошкевич, Б.С. Патон, Д.А. Дудко, О.І. Корінний)



Разом з Новокраматорським машинобудівним заводом розроблено технологію електрошлакового зварювання металу завтовшки до 2000 мм (прес зусиллям 650 МН, виготовлений на НКМЗ для Франції із застосуванням ЕШЗ, 1957 р.)

стічних відповідальних конструкцій з алюмінію, титану, міді та їх сплавів (Д.М. Рабкін, С.М. Гуревич, В.Ф. Грабін, А.М. Макара та ін.)

За короткий час було організовано виробництво потужних пресів та гідротурбін, атомних реакторів, кораблів, прокатних станів, судин високого тиску та котлів зі спеціальних сталей, літаків, ракет, хімічних апаратів з алюмінію та його сплавів, титану та інших великих виробів у зварювально-литому, зварювально-прокатному та зварювально-кованому виконанні. Вже у 1952 р. ЕШЗ впровадили на 16 великих машинобудівних заводах. У розробці та освоєнні ЕШЗ брали участь заводи Краматорська, Маріуполя, інші підприємства та конструкторські організації.

ЕШЗ міді та її сплавів застосовують для з'єднання масивних заготовок завтовшки 60...200 мм із довжиною стику до 1000 мм. Широке поширення набула ЕШЗ алюмінію та його сплавів, застосування якого особливо економічно вигідно при товщині металу 25 мм і більше.

У 1958 р. світова громадськість познайомила-ся з ЕШЗ на Всесвітній виставці в Брюсселі, де новий вид з'єднання здобув найвищу нагороду – Гран-Прі.

Обладнання для зварювання плавленням

Наприкінці 1943 р., після вирішення наукових, технологічних, конструкторських проблем та організації впровадження автоматичного зварювання у виробництво танків, бомб та снарядів Є.О. Патон поставив перед колективом ІЕЗ завдання – створити високоефективні технології, універсальні зварювальні апарати та спеціалізовані установки для механізованого зварювання металоконструкцій, засобів транспорту, шахтного обладнання та ін.

Для створення інноваційного обладнання провели системний аналіз всіх складових частин зва-

рювальної техніки. В ІЕЗ розробляли принципи конструювання як зварювальних головок, так і самохідних тракторів, систем керування процесом зварювання та джерел живлення.

Проекти обладнання для допоміжних та суміжних операцій (кантувачі, верстати та пристрої спеціального призначення) були узгоджені зі зварювальними операціями. Однією з умов було спрощення апаратури управління для зниження вимог до кваліфікації робочих та мінімізації кількості кнопок і ручок управління.

У 1945 р. в ІЕЗ були розроблені апарат на самохідному візку, що пересувається рейкою (УСА-2), і зварювальний трактор (ТС-6) (П.І. Севбо і В.Є. Патон).

У 1947 р. Радою Міністрів СРСР за проектом, розробленим Є.О. Патонем, було прийнято постанову «Про розширення застосування в промисловості автоматичного електрозварювання під шаром флюсу», згідно з якою в найближчі півтора роки необхідно було ввести в експлуатацію 670 зварювальних автоматів на 111 заводах країни.

У 1948 р. Б.Є. Патон розробив для дугового автоматичного зварювання під шаром флюсу одномоторний універсальний зварювальний автомат-трактор ТС-17 для зварювання швів стикових та кутових з'єднань. Ця технологія виявилася найбільш досконалою – порівняно невеликі розміри і маса (42 кг), вдале компонування та простота в експлуатації. ТС-17 масово випускали кілька десятиліть.

Модифіковані конструкції розробили для зварювання виробів у різних галузях техніки. Так, у суднобудуванні для одностороннього автоматичного зварювання під шаром флюсу полотниць завтовшки 6...20 мм з формуванням кореня шва на водоохолоджуваному мідному повзуні, що рухається, застосовувалися трактори ТС-32 і ТС-44.

Для зварювання полотниць завтовшки до 100 мм були розроблені дводугові трактори ТС-38 та ТС-58. При виготовленні алюмінієвих цистерн для перевезення та зберігання ракетного палива використовувався трактор ТС-56. У подальшому було розроблено апарат для зварювання під флюсом двома електродами.

З метою типізації та уніфікації зварювальних головок в ІЕЗ було розроблено зварювальну головку АБС для серії уніфікованих апаратів, у тому числі А-348, А-639 та ін.

У 1950 р. в ІЕЗ створено тридугову самохідну зварювальну головку А-330 (В.Р. Лашкевич), яка дозволила реалізувати ідею швидкісного зварювання труб.

Розуміючи, що у багатьох виробках є шви невеликої довжини, Є.О. Патон акцентував увагу

на пришвидшенні робіт із впровадження напівавтоматичного зварювання під флюсом, розпочатої Б.Є. Патонем ще у 1943 р. Ґрунтуючись на теорії автоматів, Б.Є. Патон висунув ідею інтенсифікації саморегулювання процесу плавлення електрода та необхідності здійснення зварювання при високій щільності струму (до 200 А/мм²).

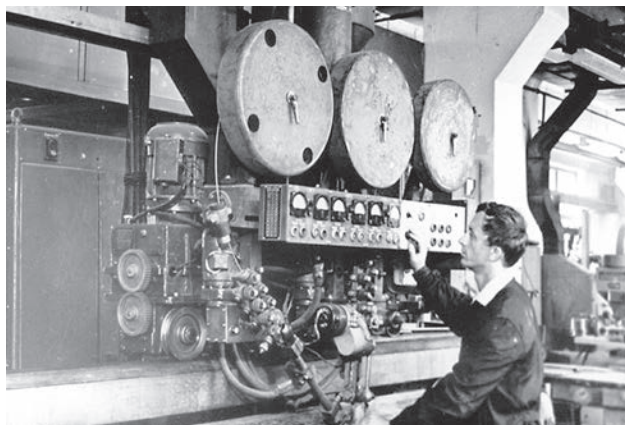
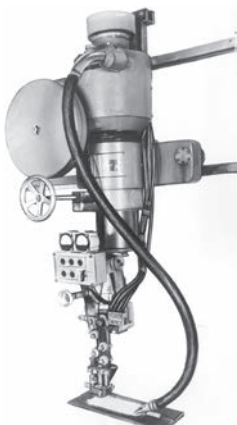
Це вирішило проблему механізованого зварювання електродом, що плавиться, під флюсом у вуглекислому та інертному газах. Було знайдено принцип напівавтоматичного зварювання під флюсом. Замість електродної проволоки діаметром 5 мм був застосований дріт меншого діаметра, що дозволило розробити надійну апаратуру. Водночас значно підвищилася стійкість процесу. У 1948 р. вдалося створити легку, транспортбельну апаратуру, що забезпечує подачу проволоки діаметром 1...2 мм через спеціальний шланг у пальник, що знаходиться в руці зварника, причому флюс подавався через лійку, закріплену на тримачі. Новий спосіб напівавтоматичного зварювання отримав назву «шлангового» (Б.Є. Патон, Д.А. Дудко та ін.).

Тисячі апаратів ПШ-5 конструкції ІЕЗ працювали безвідмовно на сотнях заводів та будівництвах.

Портативні апарати типу ПШ-6 застосовували для обварювання зв'язків топків паровозних казанів, для приварювання штуцерів, трубок до судин та інших виробів.

У 1947–1948 рр. в ІЕЗ було вирішено проблему автоматичного зварювання під флюсом вертикальних і горизонтальних швів з формуванням шва мідним охолоджуванним повзуном, що піднімається разом зі зварювальною головкою (Г.З. Волошкевич). Для цього методу створено обладнання принципово нового типу.

З 1949 р. протягом кількох років створювалися нові апарати – для зварювання мундштуком, що плавиться, пластинчастим електродом, кількома електродами, дубль апарати (П.І. Севбо, В.Є. Патон, М.Г. Бельфор, та ін.). Було розроблено одноелектродні рейкові апарати А-314 (М.Д. Литвинчук) та А-333 (А.І. Чвертко) для зварювання заготовок



завтовшки до 55 мм. Для роботи на будівлях та стапелях створені легкі портативні магнітокрокуючі апарати А-411, А-501 (В.Є. Патон) та ін. Значний внесок у розширення можливостей технології та удосконалення обладнання зробили працівники Новокраматорського машинобудівного заводу.

Першу ліцензію на апарат та технологію ЕШЗ було продано у 1959 р. шведській фірмі «ЕСАБ». Устаткування ІЕЗ експортували до Франції, Румунії, КНР, Польщі, Японії, Швеції, Індії, ФРН, Італії, Нідерландів та багатьох інших країн. Технічні рішення, знайдені при створенні апаратів для зварювання вертикальних швів, стали основою обладнання для нового виду зварювання – електрошлакового, а незабаром і для електрошлакових технологій спеціальної електрометалургії.

Для того, щоб розширити область застосування зварювання під флюсом на монтажно-будівельні роботи, було поставлено завдання про створення технології та відповідного обладнання для автоматичного зварювання не тільки вертикальних, а й стельових швів. З 1950 р. розпочали проєктування обладнання для зварювання у захисних газах. Були вивчені системи подачі дроту через довгі шланги-тримачі («тягни-штовхай», через вісь ротора, за допомогою цанги та ін.).

Ще з початку діяльності у галузі зварювання Є.О. Патон довів необхідність конструювання виробів з урахуванням особливостей та можливостей зварювальних технологій. Тому ІЕЗ разом з галузевими установами переробили конструкції вагонеток, стояків, котлів та інших виробів для переведення їх на зварювання автоматами. В основу організації лінії був покладений принцип сполучення операцій збірки та зварювання вузлів із застосуванням спеціального обладнання.

Для оснащення комплексно-механізованих та автоматизованих виробництв зварних конструкцій не тільки зварювальними автоматами та джерелами живлення, а й допоміжним обладнанням, в ІЕЗ було розроблено проєкти ролікових стендів, різних кантувачів, поворотних колон, візків, маніпуляторів, вальцезварюваль-

них станків тощо (Р.І. Лашкевич, Б.Є. Патон, О.І. Корінний та ін.). Було спроектовано трубозварювальний стан (Р.І. Лашкевич).

У 1945 р. Б.Є. Патон і В.К. Лебедев запропонували нову методику та основні формули для електромагнітних розрахунків зварювальних трансформаторів. У 1947 р. у ІЕЗ Б.Є. Патон, В.К. Лебедев, М.М. Сидоренко розробили потужний трансформатор СТ-1000 з дистанційним керуванням. Оригінальні конструкції трансформаторів задовольняли оптимальному співвідношенню між струмом короткого замикання та струмом горіння дуги. Це забезпечило досить стійкий старт дуги та інтенсивне регулювання її тривалості при зварюванні автоматичними головками з постійною швидкістю подачі.

Щоб виключити релейно-контактні схеми, що застосовувалися для відновлення режиму зварювання при коливаннях напруги в заводській мережі, Б.Є. Патон, В.К. Лебедев і Д.А. Дудко створили обладнання, що складається з трансформатора-регулятора і головки з автоматичним керуванням швидкості подачі електродного дроту або напруги дуги. Нове обладнання вирішило задачу збереження потужності дуги, тобто струму і напруги, незалежно від коливань напруги мережі.

Багато зразків зварювальної техніки, що спроектовані в ІЕЗ, є вагомим внеском у науково-технічний прогрес, випередили світовий рівень. Устаткування ІЕЗ перевершило розробки інших установ щодо низки конструктивних рішень.

В основних галузях промисловості СРСР до початку 1950 р. кількість діючих автоматів і установок зросла в машинобудуванні більш ніж у 4 рази, у суднобудуванні – майже у 6 разів, у будівництві – у 3,5 рази. Загальна кількість зварювальних автоматів, що знаходяться в експлуатації у 1946–1949 рр., збільшилась у 12 разів. У 1958 р. у СРСР 63 % парку встановленого і 54 % всього випуску електрозварювального обладнання складали зварювальні трансформатори. Застосування автоматичного зварювання під флюсом дало можливість у 3,5 рази підвищити продуктивність праці.

Матеріал підготовлено доктором іст. наук О.М. Корнієнком



Национальный университет
водного хозяйства
та природоиспользования



Wroclaw University
of Science and Technology

XVII Міжнародна науково-практична конференція

«ІНТЕГРОВАНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ» (IIPTK-2024)

21 – 22 травня 2024 р., Київ, Україна
Національний авіаційний університет

в режимі ON-LINE

Контакти: кафедра комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Аерокосмічного факультету
Національного авіаційного університету, корп. 11, ауд. 402.

м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Тел. +38044 406 71 58, +38093 721 10 41, +38098 550 90 08

E-mail: iirtk.nau@gmail.com

УСПІШНА СЕРТИФІКАЦІЯ. «ДНІПРОМЕТІЗ ТАС» ГОТУЄТЬСЯ ДО НОВИХ ВИКЛИКІВ

«ДНІПРОМЕТІЗ ТАС» – лідер ринку у виробництві метизної продукції, що спеціалізується на випуску низько- та високовуглецевого дроту.

За 2023 р. завод виробив та реалізував понад 1000 тонн зварювального дроту та посів серед виробників одне з лідируючих місць в Україні.

Під час російської агресії завод «ДНІПРОМЕТІЗ ТАС» продовжує розвивати та збільшувати своє виробництво, не дивлячись на складні обставини. 2023 р. для «ДНІПРОМЕТІЗ ТАС» – це рік значних змін і досягнень. Завод постійно розвивається, будуючи нові виробничі майданчики для задоволення зростаючого попиту на свою продукцію. Експортна діяльність компанії також активно зростає, що свідчить про впевнену конкурентоспроможність на міжнародних ринках.

Реалізовано проєкти з модернізації виробництва, спрямовані на вирішення екологічних проблем, а також на розширення асортименту продукції та збільшення обсягів виробництва. Удосконалено виробничу базу шляхом придбання для виробництва зварювального дроту сучасного обладнання від провідного шведського виробника Lämneå Bruk AB. Зварювальний дріт, що виробляється на підприємстві, широко використовується в металоконструкціях, машинобу-

дуванні, вагонобудуванні, оборонній промисловості та інших галузях.

Асортимент продукції заводу налічує широкий спектр діаметрів обмідненого зварювального дроту, а також дроту зварювального без покриття полірованого. Дріт марок G3Si1 та G4Si1 виготовляється згідно з міжнародним стандартом EN ISO 14341 (національний стандарт ДСТУ EN ISO 14341). За результатами проведеної процедури підтвердження відповідності вимогам Deutsche Bahn зварювального дроту та наплавленого методом дугового зварювання в середовищі захисного газу металу зварного шва – підтверджені позначення дроту та металу шва: **EN ISO 14341 - A - G 46 4 M21 G3Si1 та EN ISO 14341 - A - G 46 4 M21 G4Si1**. Дріт марок G3Si1 та G4Si1 займає більшу частину в загальному обсязі виробництва зварювального дроту. Випускається обміднений зварювальний дріт суцільного перерізу діаметрами 0,8, 1,0; 1,2; 1,4, 1,6, 2,0 мм на касетах по 15; 5; 2,5; 1 кг з прецизійним намотуванням. Асортимент упаковок зварювального дроту тепер включає діжки фасуванням по 250 кг для роботизованих зварювальних комплексів. Це сприяє продуктивності та забезпечує безперервну роботу роботизованої техніки, а також зменшує втрати дроту та спрощує процес зварювання.





Зварювальний дріт виробництва «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» зарекомендував себе як надійний і високоякісний продукт, що застосовується на промислових підприємствах. Зважаючи на це, завод розширив свою лінійку продукції найзатребуванішими марками електродів для ручного дугового зварювання конструкцій із вуглецевих сталей.

Центральна заводська лабораторія «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» – одна з небагатьох, які пройшли акредитацію та підтвердили свою технічну компетентність. За результатами досліджень лабораторія надає експертний висновок, який є офіційним документом. Лабораторія укомплектована приладами та випробувальним обладнанням для хімічного аналізу, механічних тестів, а також зварювально-технологічних випробувань. Сучасна власна лабораторія гарантує виконання найвищих стандартів на кожному етапі виробництва. З урахуванням різноманітних застосувань дроту, механічних і технологічних вимог, проведення ретельних випробувань є важливим для забезпечення надійності та безпеки. Для ефективного вивчення мікроструктури та механічних властивостей катанки та дроту, завод інвестував у передове обладнання інвертований мікроскоп ZEISS Axiovert 5 digital і твердомір Мікро-Віккерса. Цей інноваційний підхід забезпечує відповідність продукції найвищим міжнародним стандартам.

У січні 2024 року дріт виробництва «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» марки G4Si1 успішно пройшов випробування в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона та готовий до використання у виробництві та монтажі сталевих мостових конструкцій. Після інтенсивних випробувань отримано позитивні результати, що свідчать про високу ефективність і відмінну якість зварювального дроту. Використання дроту марки G4Si1 є дуже важливим у процесі монтажу сталевих мостів, забезпечуючи міцність і надійність конструкцій. Безсумнівно, зварювальний дріт «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» допоможе підвищити якість і тривалість експлуатації мостових споруд.

У лютому 2024 року завод «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» одним із перших українських виробників пройшов заводський виробничий аудит, який проводили кваліфіковані фахівці Deutsche Bahn AG. Результатом аудиту стало завершення кваліфікаційних випробувань обмідненого легованого зварювального дроту марок 3Si1 та 4Si1, діаметром 0,6...1,6 мм, а також отримання сертифіката відповідності від Deutsche Bahn. Цей сертифікат відкриває перед заводом широкі можливості для виходу на європейський ринок. Він підтверджує, що зварювальний дріт виробництва «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» відповідає вимогам Deutsche Bahn. Наявність такого сертифіката є обов'язковою умовою для участі в тендерах Deutsche Bahn, а також інших підприємств у сфері вагонобудування, локомотивобудування та машинобудування.

Deutsche Bahn – потужний виробник у галузі вагонобудування та локомотивобудування, має авторитет у сфері пасажирських і вантажних перевезень на залізничному та автомобільному транспорті в Німеччині та за її межами. Як один з найбільших транспортних операторів в Європі та у світі, Deutsche Bahn є важливим учасником у галузі мобільності та має авторитет і суттєвий вплив на розвиток і формування транспортного сектору.

Сертифікований зварювальний дріт виробництва «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» має низку переваг, які відрізняють його від конкурентів:

1. **Достовірність і надійність.** Сертифікація продукції Deutsche Bahn підтверджує відповідність її високим європейським стандартам якості та безпеки. Це збільшує довіру до продукції з боку клієнтів та партнерів компанії.
2. **Доступ до ринку.** Підтвердження відповідності продукції стандартам Deutsche Bahn відкриває доступ до галузі залізничного машинобудування, дозволяючи «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» брати участь у тендерах та укладати контракти з Deutsche Bahn та іншими залізничними операторами Європи, які дотримуються подібних стандартів.
3. **Безпека та сумісність.** Зварювальний дріт, сертифікований Deutsche Bahn, відповідає вимогам безпеки та сумісності з інфраструктурою залізничної мережі, що важливо для забезпечення надійної та безпечної роботи потягів.
4. **Репутація та бренд.** Сертифікація продукції Deutsche Bahn свідчить про високий рівень якості та відповідності міжнародним стандартам. Це зміцнює репутацію та бренд компанії як надійного та інноваційного постачальника зварювальних матеріалів.

Завдяки високій якості та надійності, зварювальний дріт виробництва «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» успішно конкурує з продукцією європейських виробників на міжнародних ринках.

ЦЕНТР СЕРТИФІКАЦІЇ ПРИ УТ НКТД СЕРТИФІКУЄ ПЕРСОНАЛ З НК В ІЗРАЇЛІ

Одна з провідних фірм Ізраїлю, що працює в галузі неруйнівного контролю, – MOREX 71 LTD, – замовила в Центрі сертифікації при УТ НКТД (Київ, Україна) атестацію персоналу з рентгеновського, магнітного, ультразвукового, вихрострумового, капілярного та візуального контролю. Всього мали пройти ресертифікацію згідно з вимогами EN ISO 9712 сімнадцять фахівців, у тім числі, два – на третій кваліфікаційний рівень.

Чому фірма Ізраїлю звернулась за послугами із сертифікації персоналу до ОСП з України?

По-перше, ЦС при УТ НКТД понад два десятиліття успішно працює в галузі сертифікації персоналу в Україні та в багатьох сусідніх країнах. Ми маємо Атестат про акредитацію від Національного агентства з акредитації України, яке, в свою чергу, є членом Європейської кооперації з акредитації (EA), Міжнародного форуму з акредитації (IAF) та підписантом Багатосторонніх Угод про взаємне визнання у сфері «сертифікація персоналу». Таким чином, акредитація, що надається НААУ у вищевказаній сфері, є еквівалентною акредитації, що надається національними органами з акредитації – підписантами угод у більш ніж 80 країнах світу.

По-друге, цінова пропозиція ЦС при УТ НКТД за сертифікацію персоналу вигідно відрізняється від пропозицій інших європейських ОСП.

По-третє, йдучи назустріч побажанням замовника, ми готові працювати в режимі виїзної екзаменаційної сесії. Крім того, в умовах сьогодення в Ізраїлі, європейські фахівці з атестації не проявляють бажання там працювати.



Фірма MOREX 71 LTD

Таким чином, два фахівці ЦС при УТ НКТД Юрій Посипайко і Віктор Глуховський поїхали у відрядження до колег Ізраїлю. З Києва через мережу Інтернет їм допомагали в роботі Валентин Литвиненко, Роман Пастовенський та Андрій Шекеро.

Фірма MOREX 71 LTD надає послуги з неруйнівного контролю на всій території країни, працюючи на підприємствах нафтохімічної, аерокосмічної, атомної промисловості, у суднобудуванні, трубопроводному, автомобільному та залізничному транспорті, на технічних базах військово-морських сил тощо. Центральний офіс фірми розташований в містечку Евен Студа біля Тель-Авіва, північний – в містечку Кір'ят Біялик біля Хайфи, а південний – в місті Беер Шева.

Наші фахівці відвідали всі три філіали фірми, організовуючи екзаменаційний процес та знайомлячись з роботою кандидатів на ресертифікацію. У вільний час вони мали змогу ознайомитися з життям в Ізраїлі та відвідали Тель-Авів і Єрусалим.



Під час проведення сертифікації





ВИСТАВКА «RAILWAY INTERCHANGE 2023»

01–04 жовтня 2023 р. в США, м. Індіанополіс, відбулася виставка «Railway Interchange 2023», на якій були присутні понад 8500 відвідувачів з понад 40 країн, 750 експонентів/спонсорів-учасників і десятки засобів масової інформації. Це найкрупніший форум у залізничній галузі Північної Америки, аудиторією якої є висококваліфіковані особи, що приймають рішення з питань залізничного транспорту. «Railway Interchange» пропонує неперевершену можливість вивчити новітні технології, послуги та дослідження, представлені провідними членами Інституту залізничного постачання (RSI), Асоціації постачальників інженерно-технічного обслуговування залізниць (REMSA) і Асоціації постачальників залізничної галузі (RSSI), Асоціації залізничних інженерів та технічного обслуговування шляхів (AREMA) та інших партнерських асоціацій, де поєдналися нетворкінг, освіта та інновації в одному місці.

Компанія OKOndt GROUP (Київ, Україна) втретє брала активну участь у цій виставці та

представила свої дефектоскопи для неруйнівного контролю залізничних рейок, зварних з'єднань, стрілочних переводів, елементів рухомого складу. Формат виставки дозволив OKOndt GROUP продемонструвати широкий асортимент продукції та переваги наших технологій. На стенді було представлено наступні пристрої: УДС2-77 і УДС2-73 – ультразвукові (однорельсовий і дворельсовий) дефектоскопи для безперервного контролю рейок, УСП-01 – комплект для контролю зварних з'єднань рейок (у складі скануючого пристрою та дефектоскопа Sonocon B), ETS2-77, ETS2-73 і Eddycon C – вихретокові дефектоскопи для контролю рейок, прилади для контролю елементів рухомого складу. Розробки OKOndt GROUP показали свій високий технічний рівень та конкурентоспроможність на світовому ринку, викликали широкий інтерес у відвідувачів виставки. Підсумком виставки стало встановлення нових ділових контактів із залізничними дорогами американського континенту.



Стенд OKOndt GROUP на виставці «Railway Interchange 2023»



Корегування до статті з журналу «Автоматичне зварювання» №1, 2024, с. 27-32.

1. Назву статті та склад авторів навести таким чином:

Термічні цикли і мікроструктура з'єднань при контактному стиковому зварюванні опаленням рейок із сталей 110Г13Л і К76Ф через проміжну вставку із сталі 08Х18Н10Т

О.В. Кавуніченко¹, І.В. Зяхор¹, Ю.А. Шило¹, А.М. Левчук¹, Є.В. Антіпін¹, Andrew Fong²

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

²Yardway Railquip Limited, Unit A5, 29/F., TML Tower, 3 Hoi Shing Road, Tsuen Wan, N.T., Hong Kong

Thermal cycles and microstructure of the flash butt welded joints of 110G13L and K76F steel rails through 08Xh18N10T steel insert

O.V. Kavunichenko¹, I.V. Ziahor¹, Yu.A. Shylo¹, A.M. Levchuk¹, Ye.V. Antipin¹, Andrew Fong²

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

²Yardway Railquip Limited, Unit A5, 29/F., TML Tower, 3 Hoi Shing Road, Tsuen Wan, N.T., Hong Kong

2. Відкореговані підписи до рис. 4, 6, 7, 8.

Рис. 4. Розподіл температури по осі рейок перед осадкою при КСЗО сталей К76Ф і 08Х18Н10Т (розрахунок)

Рис. 6. Термічні цикли КСЗО на різній відстані від лінії з'єднання сталей К76Ф і 08Х18Н10Т

Рис. 7. Розподіл температури по осі рейок перед осадкою при КСЗО сталей 08Х18Н10Т і 110Г13Л (розрахунок)

Рис. 8. Термічні цикли КСЗО на різній відстані від лінії з'єднання сталей 08Х18Н10Т і 110Г13Л