

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

11 2021

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

ФІЗИКА ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ ТА ТЕХНІКА ПЛАЗМИ

Размишляев О.Д., Агеева М.В. Характеристики столба дуги при TIG-зварюванні з дією поздовжнього магнітного поля3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ

Кораб М.Г., Юрченко М.В., Ващук А.В., Сенченков І.К. Моделювання теплових процесів при лазерному зварюванні полімерів8

ЗВАРЮВАННЯ В ТВЕРДІЙ ФАЗІ

Качинський В.С., Manurung Yupiter HP. Дослідження якості зварного з'єднання труб зі сталі марки ASTM A106/API 5L з використанням пресового зварювання магнітокеруваною дугою15

3D ДРУК

Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. Застосування SLM-технології для виготовлення дентальних імплантів зі сплаву Ti-6Al-4V21

ЕЛЕКТРОШЛАКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю. Порівняння процесів електрошлакового зварювання при підключенні електричного живлення за моно- та біфілярною схемами28

ТЕРМІТНЕ ЗВАРЮВАННЯ

Турик Е., Рябцев І.О., Ломозік М., Красновський К. Дослідження причин появи дефектів в зварних стиках трамвайних рейок, виконаних термітним зварюванням35

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

Ланкін Ю.М. Вимоги до технічних характеристик машин контактного мікрозварювання40

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Бурлаченко О.М., Цимбаліста Т.В., Васильківська М.А., Быба Є.Г. Композиційні порошки на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з додками тугоплавких сполук для газотермічного нанесення покриттів44

ІНФОРМАЦІЯ

Внесок ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в розвиток науки і техніки незалежної України54
IV Міжнародна конференція «Сучасні технології та методи неорганічного матеріалознавства»57
VII Міжнародна конференція HighMatTech-202158
Передплата 202260

CONTENT

GAS DISCHARGE PHYSICS AND PLASMA TECHNIK

Razmyshlyayev O.D., Ahieieva M.V. Characteristics of arc column during tig welding with the effect of longitudinal magnetic field3

PROCESS MODELING

Korab M.G., Iurzhenko M.V., Vashchuk A.V., Senchenkov I.K. Modelling of thermal processes in laser welding of polymers8

SOLID PHASE WELDING

Kachinskyi V.S., Manurung Yupiter HP. Investigations of the quality of welded joints of pipes from steel of ASTM A106/API 5L grade, using magnetically impelled arc butt welding15

3D PRINTING

Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V. Application of SLM-technology for manufacture of dental implants from Ti-6Al-4V alloy21

ELECTROSLAG TECHNOLOGIES

Lankin Yu.M., Solovyov V.G., Tyukalov V.G., Romanova I.Yu. Comparison of the processes of electroslag welding at power connection by mono- and bifilar diagram28

THERMITE WELDING

Turik E., Ryabtsev I.O., Lomozik M., Krasnovskiy K. Investigation of the causes for appearance of defects in welded butt joints of tram rails made by thermit welding35

WELDING EQUIPMENT

Lankin Yu.M. Requirements to technical characteristics of resistance microwelding machines40

PROTECTIVE COATINGS

Borisov Yu.S., Borisova A.L., Burlachenko O.M., Tsybalista T.V., Vasykivska M.A., Byba Ye.G. Composite powders based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with additives of refractory compounds for thermal spraying of coatings44

INFORMATIONS

The contribution of the Paton Welding Institute in the development of science and technology of independent Ukraine54
IV International conference «Modern technologies and methods of inorganic materials science»57
VII International conference HighMatTech-202158
Subscription 202260



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

Засновники

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

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 2302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 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 2022

Передплатний індекс 70031.

12 випусків на рік (видається щомісячно).

Друкована версія: 2880 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

Електронна версія: 2880 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.

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

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU:

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

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150,
11 Kazymyr Malevych Str.
Tel.: (38044) 200 2302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 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 2022

Subscription index 70031.

12 issues per year (issued monthly), back issues available.
\$216, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$144, 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.

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

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТОВПА ДУГИ ПРИ TIG-ЗВАРЮВАННІ З ДІЄЮ ПОЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

О.Д. Размишляєв¹, М.В. Агєєва²

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.

E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²Донбаська державна машинобудівна академія. 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72. E-mail: maryna_ah@ukr.net

Розроблений пристрій, який дозволяє вводити зонд із вольфрамового дротика в плазму стовпа дуги при TIG-зварюванні. Робота пристрою полягала в тому, що металева струна діаметром в межах $(0,25 \dots 0,4) \cdot 10^{-3}$ м пружно деформувалась (закручувалась) при дії на неї крутильного моменту. При руху плазми стовпа дуги на зонд діяло зусилля напору, струна пружно деформувалась, і це дозволило встановити швидкість плазми стовпа дуги, що оберталась навколо її вісі при TIG-зварюванні при дії постійного поздовжнього магнітного поля. Дуга горіла між вольфрамовим електродом і мідною пластиною товщиною $6 \cdot 10^{-3}$ м на прямій полярності без перемішування електрода ($v_{\text{зв}} = 0$). Довжина дуги становила $4,0 \cdot 10^{-3}$ м. Встановлено, що при силі зварювального струму 200 А, збільшення індукції магнітного поля від 18 до 45 мТл призводить до збільшення азимутальної швидкості плазми стовпа дуги на відстані в межах $(3 \dots 4) \cdot 10^{-3}$ м від його вісі в межах від 17 до 20 м/год, а кутової швидкості обертання – в межах від 750 до 940 об/с. В роботі виконані зондування плазми стовпа дуги подвійним зондом при TIG-зварюванні із дією постійного поздовжнього магнітного поля. Зондами служили вольфрамові дротики діаметром $0,3 \cdot 10^{-3}$ м. За результатами вимірювань падіння напруги між зондами були встановлені значення поздовжньої і азимутальної щільності струму в заданій точці при TIG-зварюванні. Встановлено, що при рівні індукції магнітного поля в межах 18...45 мТл і струму дуги 200 А значення азимутальної компоненти щільності струму в стовпі дуги приблизно такі ж, як і значення поздовжньої компоненти щільності струму в стовпі дуги. Бібліогр. 14, рис. 6.

Ключові слова: TIG-зварювання, поздовжнє магнітне поле, індукція, щільність струму

Застосування поздовжнього магнітного поля (ПДМП) розширює технологічні можливості електродугового зварювання плавким електродом під флюсом і неплавким (вольфрамовим) електродом в середовищі захисних газів (частіше, в аргоні) [1, 2]. Процес TIG-зварювання доцільно застосовувати при зварюванні тонколистового металу, і при цьому перспективним є використання ПДМП. Але особливості TIG-зварювання з дією ПДМП недостатньо вивчені. В роботах [1, 3] показано, що при зварюванні з дією ПДМП значно зменшується глибина проплавлення металу. В роботах [1, 3–8] показано, що це обумовлено зменшенням тиску зварювальної дуги на рідкий метал під дугою, а також змінами розмірів активної плями дуги на виробі, що зварюється.

В роботах [1, 2, 6, 9] показано, що при TIG-зварюванні з дією постійного ПДМП стовп зварювальної дуги обертається навколо його поздовжньої вісі. В роботі [9] експериментально встановлено, що швидкість обертання стовпа дуги при дії постійного ПДМП, якщо $I_{\text{зв}} = 100$ А, а індукція $B = 5 \dots 10$ мТл, азимутальна швидкість досягає 30 м/год, а швидкість обертання стовпа дуги навколо його вісі складає 280 об/с. Але ці дані відносяться до процесу, коли використовували кільцевий анод. В роботах [10, 11] вивчали поведінку стовпа дуги при TIG-зварюванні роз-

рахунковим методом. Але одержані в цих роботах дані відносяться до дуги в аргоні між графітовими електродами діаметром 1,0 мм, струму $I_{\text{зв}}$ в межах 15...100 А, довжині дуги 20 мм, індукції ПДМП до 6 мТл. Ці дані не можуть бути застосовані для практичного процесу зварювання, коли використовують вольфрамовий дріт діаметрами 2...4 мм, а струм зварювання складає орієнтовно $I_{\text{зв}} = 100 \dots 300$ А.

Напрямок та швидкість обертання дуги при TIG-зварюванні в постійному ПДМП недостатньо вивчені. В роботі [1] дані, отримані швидкісною кінозйомкою дуги в магнітному полі, мають якісний характер. Зокрема, в цій роботі сказано наступне: «дуга безінерційно прямує за зміною індукції поздовжнього магнітного поля». З цього випливає, що дуга обертається з частотою не менш 50 об/с. Обертання газоподібного провідника зі струмом в магнітному полі – це обертання заряджених частинок в електромагнітному полі. Однак, як зазначалося, напрямок цього обертання за уявленнями ряду дослідників суперечливо. За даними роботи [12] обертання дуги спрямовано в сторону руху позитивних іонів. В роботі [9] для дуги, що горить на кільцевому аноді, показано, що обертання плазми стовпа дуги при дії постійного ПДМП обумовлено тільки рухом електронів і направлено в сторону руху електронів. У зв'язку

Размишляєв О.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-6616-7717>, Агєєва М.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8275-6781>

© О.Д. Размишляєв1, М.В. Агєєва, 2021

з цим актуальним є дослідити напрямок і швидкість обертання дуги для процесу TIG-зварювання з дією постійного ПДМП. Ці дані можуть бути корисними для пояснення явищ, характерних для процесу проплавлення при дуговому зварюванні та наплавленні з дією ПДМП.

Метою даної роботи є визначення особливостей (характеристик) стовпа дуги при TIG-зварюванні з дією керуючого постійного ПДМП.

Для визначення напрямку і швидкості обертання стовпа дуги при TIG-зварюванні з дією постійного ПДМП використовували метод зондів і пристрій, наведений на рис. 1. В цьому випадку струну 5 закріплювали вертикально на опорах 6 для переміщення зонду 4 в горизонтальній площині. Зонд попередньо встановлювався перпендикулярно до напрямку пальника і паралельно поверхні пластини на певній відстані від неї. Дуга 2 горіла між вольфрамовим електродом 1 і мідною пластиною 3. Від лазерної вказівки 7 промінь падавав на дзеркальце 8, і відбившись від нього падавав на екран 9. Процес відхилення променя (зображення на екрані) при дії дуги 2 на зонд 4 знімали відеокамерою PANASONIC (з частотою 50 кадрів/с). Демпфер 10 служив для зменшення коливань зонда 4 при зварюванні.

При зварюванні застосовували вольфрамовий електрод марки ВЛ діаметром 4 мм, електрод заточували на конус з кутом в 90° (без притуплення). Експерименти показали, що при горінні дуги протягом 30 хв (достатній час для виконання серії експериментів) форма торця електрода (катода) практично не змінювалася. Для захисту дуги використовували аргон марки А (ГОСТ 10157-73), витрати якого складають 5...7 л/хв. Зварювання вольфрамовим електродом в аргоні здійснюва-

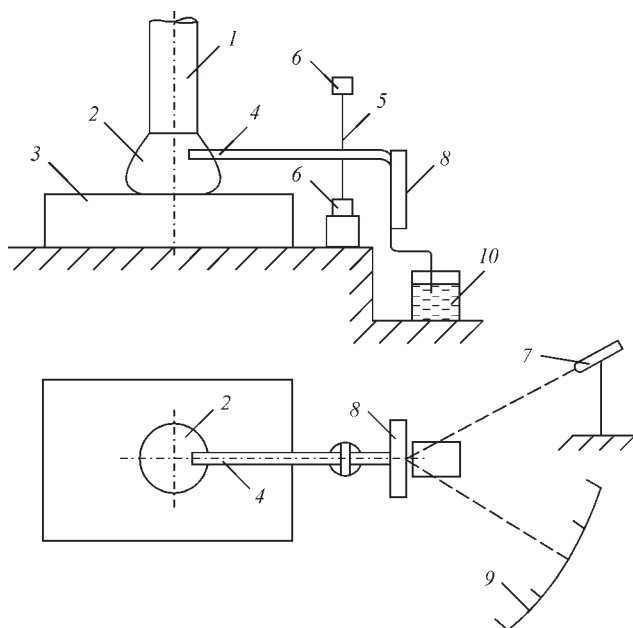


Рис. 1. Схема пристрою для вимірювання силового впливу стовпа дуги на зонд (позначення див. у тексті)

ли з закріплюваним пальником, в нижній частині якого співвісно з електродом кріпили соленоїд з феромагнітним осердям для створення ПДМП (на рис. 1 не показано). У якості джерела живлення використовували випрямляч типу ВСЖ-303. Для створення падаючої характеристики зварювального поста і регулювання зварювального струму застосовували баластні реостати типу РБ-301.

Зварювання виконували на режимі: $I_{\text{зв}} = 200 \text{ А}$, $I_{\text{д}} = 4 \text{ мм}$, $v_{\text{зв}} = 0 \text{ м/год}$. У всіх експериментах використовували зонд 4 з вольфрамового дротика діаметром 1 мм.

Для визначення співвідношення між силою впливу дуги на зонд і відхиленням променя на екрані отримали тарувальні криві (при цьому до зонду підвішували гирьки). Для визначення зусилля плазми дуги на зонд, що вводився в зварювальну дугу, використовували отримані тарувальні криві.

При зварюванні відстань від торця електрода до виробу-пластини становила 4 мм. Перед зварюванням встановлювали торець зонду на відстані 1,5 мм до вісі дуги за схемою рис. 2. Зовнішній вигляд зонда в дузі, що горить в аргоні між вольфрамовим електродом і мідною пластиною при зварюванні і після гасіння дуги представлений на рис. 3.

Швидкість плазми дуги визначали наступним чином. По відхиленню променя на екрані і даними тарувального графіка визначали силу гідродинамічного напору плазми стовпа дуги на зонд F_z , Н.

Розраховували силу гідродинамічного напору стовпа дуги на зонд F_z , Н. Оскільки

$$F = C_d S_3 \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

то лінійна швидкість плазми стовпа дуги v , м/с:

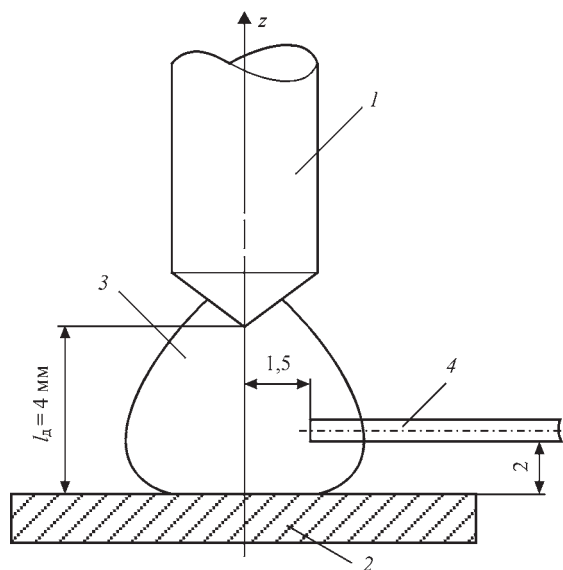


Рис. 2. Схема установки зонду при вимірюванні сили впливу дуги на зонд: 1 – електрод; 2 – виріб (пластина); 3 – дуга; 4 – зонд

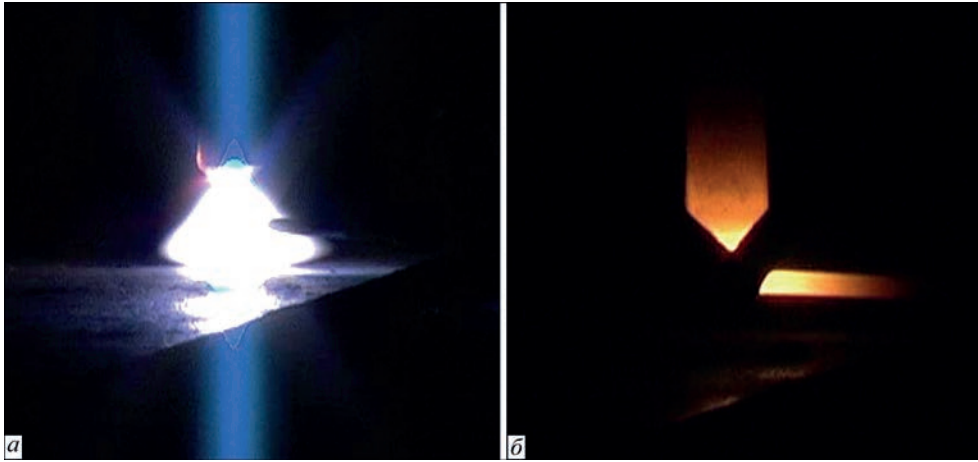


Рис. 3. Зовнішній вигляд розташування зонда в палаючій дузі (а) і після її виключення (б)

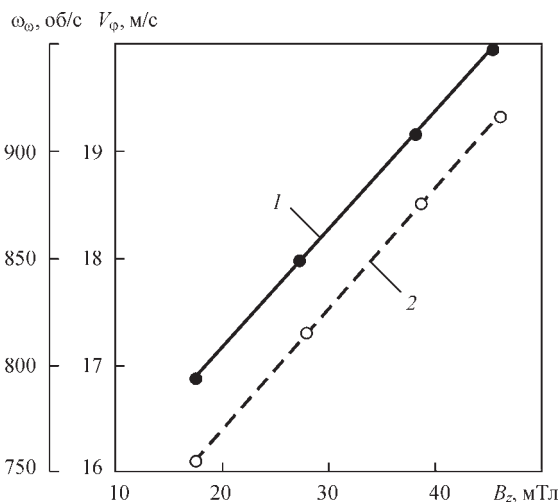
$$v = \sqrt{\frac{2F_3}{C_{\text{л}} S_3 \rho}}, \quad (2)$$

де $S_3 = ld$ – площа (лобової) частини зонда, зануреного в стовп дуги, м^2 ; l – довжина зануреної частини зонда, м ; d – діаметр зонда, м ; ρ – щільність аргону при $T = 20^\circ\text{C}$, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\rho = 1,78 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$; $C_{\text{л}}$ – коефіцієнт лобового опору зонда.

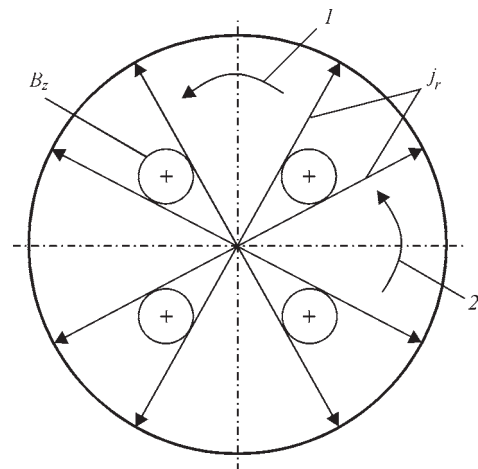
В розрахунках використовували значення $C_{\text{л}} = 1,0$ [13, 14].

Встановлено, що при збільшенні індукції B_z постійного ПДМП при ТІГ-зварюванні тангенціальна (азимутальна) швидкість потоку плазми в дузі V_{ϕ} зростає від 17 до 20 м/год, а кутова швидкість обертання дуги складає близько 750...940 об/с (рис. 4). Ці дані отримані при врахуванні, що щільність газів зворотно пропорційна температурі. Приймаючи температуру зварювальної дуги $T_{\text{д}} = 12000 \text{ К}$, наведені дані про щільність аргону для формул (1), (2), зменшували у $\sqrt{T_{\text{д}}/T_0} = \sqrt{1200/300} \approx 6$ разів.

Напрямок обертання стовпа дуги при дії ПДМП завжди відповідав напрямку вектору сили


 Рис. 4. Залежність азимутальної швидкості і кутової швидкості обертання стовпа дуги від індукції ПДМП: 1 – V_{ϕ} ; 2 – ω_{ϕ} ; $I_{\text{зв}} = 200 \text{ А}$; $l_{\text{д}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

від векторного добутку осової складової індукції B_z ПДМП з радіальною складовою щільності струму в дузі j_r . Співпадання напрямку обертання стовпа зварювальної дуги навколо своєї вісі з напрямком обертання електронів в стовпі дуги можна пояснити таким чином. Згідно зі схемою, наведеною на рис. 5, лінії індукції B_z ПДМП направлені зверху вниз (рис. 5) вздовж вісі (вісі z по рис. 1). В поперечному перерізі зварювальної дуги мають місце радіальні компоненти щільності зварювального струму j_r (на рис. 5 показано, що ці вектори направлені від центру). Тоді за правилом лівої руки електрони в стовпі зварювальної дуги обертаються в напрямку, показаному лінією 1 на рис. 5, тобто проти часової стрілки. Напрямок переміщення кінця зонда (4) при проведенні експериментів завжди співпадав з вказаним напрямком. Обертання електронів в стовпі зварювальної дуги на рис. 5 показано лінією 1, а лінія 2 показує напрямок обертання плазми стовпа зварювальної дуги при дії постійного ПДМП, отриманий при про-


 Рис. 5. Схема до визначення напрямку руху плазми стовпа дуги при ТІГ-зварюванні з дією постійного ПДМП (вид зверху на поперечний переріз зварювальної дуги на площу пластини (б) по рис. 1): 1) j_r – радіальна компонента щільності струму в стовпі дуги; B_z – поздовжня компонента індукції ПДМП; 1 – напрямок руху електронів; 2 – напрямок переміщення кінця вольфрамового зонда (4)

веденні експериментів. Таким чином, обертання стовпа дуги при TIG-зварюванні з дією постійного ПДМП обумовлено рухом електронів.

Виконували експерименти з введенням в зварювальну дугу подвійного зонду. Для цього був виготовлений спеціальний пристрій. Зондами служили вольфрамові дрітики діаметром 0,3 мм, які розміщували в алундових ізоляторах зовнішнім діаметром 1,5 мм. Відстань між вісями дрітків становила $d = 1,5$ мм. Зварювання здійснювали без переміщення електрода ($v_{зв} = 0$). Утримувач зондів дозволяв розташовувати їх як перпендикулярно, так і паралельно вісі дуги. При зварюванні записували падіння напруги між зондами і параметри режиму зварювання $I_{зв}$, U_d . Для вимірювань значень ΔU_z подвійний зонд вводили в дугу так, що відстань нижньої поверхні зонда до виробу (мідної пластини) становила 1,0 мм (довжина дуги становила $l_d = 4$ мм). Для вимірювання значень ΔU_ϕ площину двох зондів розташовували так, щоб вона збігалася з горизонтальною площиною і перебувала на відстані 1 мм від виробу. Глибина введення зондів була такою, що торці зондів були на відстані 1,5 мм від вісі дуги.

Як показано в роботах [13, 14] подвійний зонд дозволяє не враховувати відому похибку, яка обумовлена додатковим потенціалом зонду щодо потенціалу стовпа дуги, оскільки вони віднімаються (невідомі негативні потенціали зондів, які обумовлені дифузією електронів з плазми на зонд). Крім того, оскільки провідність плазми σ однакова в одній і тій самій точці (або малої області) дуги, то за результатами вимірювань падіння напруги між зондами (ΔU_z або ΔU_ϕ) можна оцінити компоненти щільності струму в дузі за формулами

$$j_z = \frac{\Delta U_z}{d} \sigma; j_\phi = \frac{\Delta U_\phi}{d} \sigma \quad (d - \text{відстань між осями}$$

двох зондів, σ – електропровідність плазми стовпа дуги). В цьому випадку можна і не визначати значення σ для плазми дуги, а отримати співвідношення щільності струмів $j_\phi/j_{зв}$.

При зондуванні здійснювали відеозйомку дуги камерою PANASONIC з частотою 50 кадр/с. По зображеннях зондів на кадрах зйомки уточнювали їх положення в дузі.

Дані досліджень показали, що при збільшенні індукції постійного ПДМП параметр $E_\phi = \Delta U_\phi / d$ практично лінійно зростає (рис. 6, крива 2). При значеннях індукції $B_z = 30$ мТл значення E_ϕ досягає значень E_z і при подальшому зростанні B_z перевищує значення E_z (рис. 6, крива 1). При індукції $B_z = 15$ мТл співвідношення $E_\phi/E_z \approx 0,67$. Значення E_z практично не залежать від індукції B_z (рис. 6, крива 1) і становить величину порядку $E_z = 1$ В/мм. Слід зазначити, що співвідношен-

$E_z, E_\phi, \text{ В/мм}; I_\phi/I_{зв}$

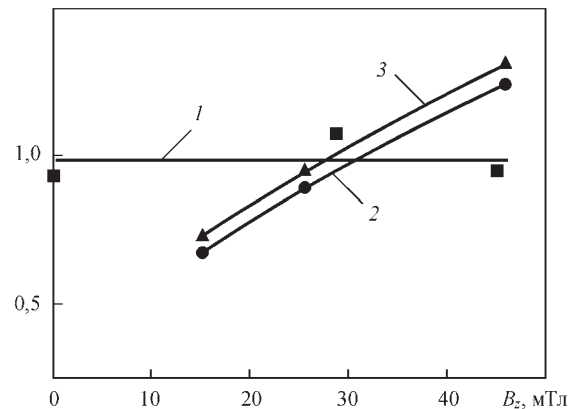


Рис. 6. Вплив індукції B_z постійного ПДМП на градієнти потенціалів стовпа дуги і співвідношення струмів $I_\phi/I_{зв}$ ($I_{зв} = 200$ А, $l_d = 4$ мм): 1 – E_z ; 2 – E_ϕ ; 3 – $I_\phi/I_{зв}$

ня E_ϕ/E_z є еквівалентним співвідношенню I_ϕ/I_z і ці співвідношення наведені на рис. 6, крива 3.

Таким чином, величина азимутальної щільності струму порівняна з величиною зварювального струму. Безумовно отримані дані в силу неточності даних про діаметр стовпа дуги і коефіцієнта лобового опору зонду при дії на нього плазми стовпа дуги слід вважати орієнтовними. Але ці встановлені факти необхідно враховувати при аналізі процесів в зварювальній дузі при дії ПДМП.

Висновки

1. При TIG-зварюванні з дією керуючого постійного ПДМП метод зондування стовпа дуги дозволив встановити, що при значенні зварювального струму дуги 200 А, довжині дуги $4 \cdot 10^{-3}$ м збільшення індукції магнітного поля від 18 до 45 мТл в точці на відстані від вісі дуги $(3 \dots 4) \cdot 10^{-3}$ м та $1,0 \cdot 10^{-3}$ м від основного металу (мідної пластини) азимутальна швидкість плазми стовпа дуги зростає від 17 до 20 м/год, а кутова швидкість його обертання – від 750 до 940 об/с.

2. Зондування плазми стовпа дуги подвійним зондом дозволило встановити, що при TIG-зварюванні з дією керуючого постійного ПДМП азимутальна складова щільності струму (при струмі дуги 200 А і довжині дуги $4,0 \cdot 10^{-3}$ м) може досягати значень поздовжньої компоненти щільності струму в стовпі зварювальної дуги.

Список літератури

1. Черныш В.П., Кузнецов В.Д., Брисман А.Н., Шеленков Г.М. (1983) *Сварка с электромагнитным перемешиванием*. Киев, Техника.
2. Размышляев А.Д., Выдымыш П.А., Агеева М.В. (2017) *Автоматическая электродуговая сварка под флюсом с воздействием внешнего магнитного поля*. Мариуполь, ГВУЗ «ПГТУ».
3. Размышляев А.Д. Миронова М.В., Дели А.А. (2009) Особенности проплавления металла при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом в продольном магнитном поле. *Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. праць*, 19, сс. 185–187.

4. Hua, A., Yin, S., Chen, S. et al. (2010) Behavior of arc and drop transfer of mag welding controlled by longitudinal magnetic field. *Journal of Mechanical Engineering*. 46, 14, 95–100.
5. Yin, X., Gou, J., Ma, N. (2011) Numerical simulation of arc and weld pool for GTAW in external axial magnetic fields. *Transactions of JWRI, Special Issue on WSE 2011*, 17–27.
6. Кузнецов В.Д., Малинkin И.В., Сыроватка В.В. (1972) Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке в продольном магнитном поле. *Сварочное производство*, 4, 3–4.
7. Размышляев А.Д., Миронова М.В., Дели А.А. (2008) Влияние продольного магнитного поля на характеристики дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне. *Автоматическая сварка*, 3, 21–25.
8. Селяненок В.Н., Блинков В.А., Казаков Ю.В. (1975) О формировании сварного шва в продольном магнитном поле при аргонодуговой сварке. *Сварочное производство*, 11, 5–7.
9. Гвоздецкий В.С., Мечев В.С. (1963) Исследование вращающейся в магнитном поле сварочной дуги постоянного тока (плоская и конусная дуга). *Автоматическая сварка*, 12, 1–6.
10. Урусов Р.М. (2003) Расчет электрической дуги в продольном магнитном поле. *Теплофизика высоких температур*, 41, 2, 181–188.
11. Урусов Р.М., Урусова И.Р. (2019) О механизме формирования винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле. *Там же*, 57, 3, 328–337.
12. Биржев В.А., Болдырев А.М. (1982) О влиянии продольного магнитного поля на сварочную дугу прямой полярности. *Автоматическая сварка*, 1, 15–19.
13. Ленивкин В.А., Петров П.И., Дюржеров Н.Г. (1984) Определение скоростного напора плазмы сварочной дуги. *Сварочное производство*, 7, 3–4.
14. Ленивкин В.А., Дюржеров Н.Г., Сагиров Х.Н. (1989) *Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах*. Москва, Машиностроение.
2. Razмышlyayev, A.D., Vydmysh, P.A., Ageeva, M.V. (2017) *Automatic submerged-arc welding under impact of magnetic field*. Mariupol, PGTU [in Russian].
3. Razмышlyayev, A.D., Mironova, M.V., Deli, A.A. (2009) Peculiarities of metal penetration at tungsten electrode argon arc welding in longitudinal magnetic field. *Visnyk Pryazov. DTU*, 19, 185–187 [in Russian].
4. Hua, A., Yin, S., Chen, S. et al. (2010) Behavior of arc and drop transfer of MAG welding controlled by longitudinal magnetic field. *Journal of Mechanical Engineering*. 46, 14, 95–100.
5. Yin, X., Gou, J., Ma, N. (2011) Numerical simulation of arc and weld pool for GTAW in external axial magnetic fields. *Transact. of JWRI, Special Issue on WSE 2011*, 17–27.
6. Kuznetsov, V.D., Malinkin, I.V., Syrovatka, V.V. (1972) Behavior of arc electrode metal transfer in welding by longitudinal magnetic field. *Svarochn. Proizvodstvo*, 4, 3–4 [in Russian].
7. Razмышlyayev, A.D., Mironova, M.V., Deli, A.A. (2008) Effect of longitudinal magnetic field on characteristics of the arc in TIG welding in argon atmosphere. *The Paton Welding J.*, 3, 13–17.
8. Selyanenko, V.N., Blinkov, V.A., Kazakov, Yu.V. (1975) On weld formation in longitudinal magnetic field at argon arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, 11, 5–7 [in Russian].
9. Gvozdetzky, V.S., Mechev, V.S. (1963) Investigation of magnetically-impelled dc welding arc (flat and conical). *Avtomatich Svarka*, 12, 1–6 [in Russian].
10. Urusov, R.M. (2003) Calculation of electric arc in longitudinal magnetic field. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 41(2), 181–188 [in Russian].
11. Urusov, R.M., Urusova, I.R. (2019) On mechanism of formation of helical shape electric arc in external axial magnetic field. *Ibid.*, 57(3), 328–337 [in Russian].
12. Birzhev, V.A., Boldyrev, A.M. (1982) About effect of longitudinal magnetic field on welding arc of straight polarity. *Avtomatich. Svarka*, 1, 15–19 [in Russian].
13. Lenivkin, V.A., Petrov, P.I., Dyurgerov, N.G. (1984) Determination of velocity head of welding arc. *Svarochn. Proizvodstvo*, 7, 3–4 [in Russian].
14. Lenivkin, V.A., Dyurgerov, N.G., Sagirov, Kh.N. (1989) *Technological properties of shielded-gas welding arc*. Moscow, Mashinostroyeniye [in Russian].

References

CHARACTERISTICS OF ARC COLUMN DURING TIG WELDING WITH THE EFFECT OF LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD

O.D. Razмышlyayev¹, M.V. Ahicieva²

¹SHEI «Priazov State Technical University», 7 Universitetskaya Str., 87500, Mariupol, E-mail: razмышlyayev@gmail.com

²Donbass State Mechanical Academy, 72 Akademicheskaya Str., 84413, Kramatorsk. E-mail: maryna__ah@ukr.net

A device was designed that allows inserting a tungsten dart probe into the plasma of arc column during TIG welding. The operation of the device envisaged that a metal string with a diameter in the range of $(0.25 \dots 0.4) \cdot 10^{-3}$ m was elastically deformed (twisted) under the action of torque. During the movement of the arc column plasma, the probe was subjected to a pressure force, the string was elastically deformed and this allowed establishing the velocity of the arc column plasma rotating around its axis during TIG welding under a constant longitudinal magnetic field. The arc burned between the tungsten electrode and a copper plate with a thickness of $6,0 \cdot 10^{-3}$ m on the direct polarity without mixing the electrode ($v_w = 0$). The length of the arc was $4,0 \cdot 10^{-3}$ m. It was found that at a welding current of 200 A, an increase in the induction of the magnetic field from 18 to 45 mT leads to an increase in the azimuthal velocity of the arc column plasma at a distance within $(3 \dots 4) \cdot 10^{-3}$ m from its axis in the range from 17 to 20 m/h, and the angular speed of rotation is in the range from 750 to 940 rps. The plasma probings of the arc column were performed with a double probe during TIG welding with the effect of a constant longitudinal magnetic field. In capacity of probes, tungsten darts with a diameter of $0,3 \cdot 10^{-3}$ m served. According to the results of measuring voltage drop, between the probes the values of longitudinal and azimuthal current densities at a set point during TIG welding were established. It was found that at the level of magnetic field induction within 18...45 mT and arc current of 200 A, the values of the azimuthal component of current density in the arc column are approximately the same as the values of the longitudinal component of current density in the arc column. 14 Ref., 6 Fig.

Keywords: TIG welding, longitudinal magnetic field, induction, current density

Надійшла до редакції 20.09.2021

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ ПОЛІМЕРІВ

М.Г. Кораб¹, М.В. Юрженко¹, А.В. Ващук¹, І.К. Сенченков²

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

²Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. 03057, м. Київ, вул. Нестерова, 3

В даній роботі було проведено математичний опис теплових процесів при лазерному зварюванні з використанням класичної теорії теплопровідності. Термічний цикл при дії випромінювання на поверхню аналізували за допомогою моделей повного теплового балансу, розподіленого поверхневого, точкового, кругового та лінійного теплових джерел. Моделювання процесу зварювання полягало у розв'язанні задачі формування теплових полів у в'язкопружних полімерних матеріалах при рухомому внутрішньому джерелі теплової енергії. Було прийнято, що верхня деталь прозора для лазерного випромінювання, нижня має заданий коефіцієнт поглинання світлового променя, а їх теплофізичні характеристики залежать від температури. Було сформульовано рівняння теплопровідності та визначальні рівняння, доповнені граничними умовами конвективного теплообміну і початковим розподілом температури. Для чисельної реалізації визначених рівнянь використаний метод скінченних елементів, в основі якого лежить альтернативне формулювання задачі. Результати математичного моделювання показали особливості формування теплових полів при трансмісійному лазерному зварюванні полімерних плівок на різних параметрах режиму зварювання. Бібліогр. 10, рис. 6.

Ключові слова: лазерне зварювання, полімерні плівки, математичне моделювання, теплові процеси, температурні поля, ізотерми

Загальний термін «зварювання випромінюванням» об'єднує способи зварювання пластмас з нагріванням зони з'єднання за рахунок перетворення в тепло енергії електромагнітного випромінювання видимої та інфрачервоної (ІЧ) ділянок спектру [1, 2]. Світлове випромінювання займає діапазон довжини електромагнітних хвиль у межах 0,2...1,0 мкм, інфрачервоного – від 1 до 2000 мкм. Лазерне джерело створює випромінювання вузького діапазону хвиль у видимій або інфрачервоній ділянках спектру в залежності від типу лазера. В залежності від виду джерела випромінювання розрізняють три способи зварювання – інфрачервоним випромінюванням, світлове зварювання та лазерне зварювання.

Найбільш поширеною в даний час технологією лазерного зварювання полімерних матеріалів є зварювання напускних з'єднань трансмісійним (проникним) методом. Суть цього методу полягає у тому, що короткохвильове лазерне випромінювання оптичного або ближнього ІЧ діапазону проходить через прозору для нього деталь зварного з'єднання та поглинається з виділенням теплоти на поверхні контакту деталей. Можливий також варіант, коли лазерне випромінювання частково поглинається обома заготовками, розігрівуючи зону зварювання.

Головною особливістю лазерного трансмісійного зварювання пластмас є необхідність підбору матеріалів з такими властивостями, що забезпечують поглинання лазерного випромінювання на ви-

значеній поверхні зварного з'єднання. Найбільш розповсюджено трансмісійне лазерне напускне зварювання листових полімерних матеріалів, коли випромінювання проходить крізь верхній прозорий лист і поглинається нижнім непрозорим. В результаті відбувається нагрівання непрозорого матеріалу і внаслідок теплопередачі розігрівується уся зона зварювання. Таким способом зазвичай зварюють полімерні плівки або тонкі пластини [3].

Технологічно лазерне зварювання є складнішим у порівнянні з іншими способами, досить складно буває визначити оптимальні параметри процесу трансмісійного лазерного зварювання, зокрема, для тонких плівок. Тому актуальним є математичне моделювання теплових процесів при цьому способі зварювання для теоретичного обґрунтування оптимальних параметрів режиму [4–6].

Властивості лазерного випромінювання суттєво відрізняють його від випромінювання будь-яких інших некогерентних джерел, тому слід окремо розглядати проблему взаємодії лазерного випромінювання з речовиною [7]. Полімери мають складну молекулярну структуру, тому вони по-різному взаємодіють з випромінюванням різної довжини хвилі [8]. Більшість полімерів у чистому вигляді без барвників та домішок є прозорими у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні спектру. Найбільш універсальними для здійснення трансмісійного лазерного зварювання є діодні (напівпровідникові) лазери. Ці лазери виготовляють з багатьма значеннями довжини

Кораб М.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, Юрженко М.В. – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>,

Ващук А.В. – <http://orcid.org/0000-0002-4524-4311>

© М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, А.В. Ващук, І.К. Сенченков, 2021

хвилі у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах випромінювання (від 0,4 до 1,45 мкм). Вони мають відносно невисоку вартість та к.к.д. на рівні 60 %.

Відомо [9], що при поглинанні випромінювання речовиною енергія квантів перетворюється в теплоту, поширення якої в матеріалі відбувається за рахунок теплопровідності. В більшості випадків можна вважати, що світлова енергія миттєво перетворюється в теплоту в тій точці, де поглинається випромінювання. Виходячи з цього припущення, опис теплових процесів для лазерного зварювання можна проводити з використанням класичної теорії теплопровідності [10].

Аналітичний опис термічного циклу при дії випромінювання на поверхню можливий при аналізі наступних моделей: повного теплового балансу; розподіленого поверхневого джерела (одномірний випадок); точкового теплового джерела; кругового джерела; лінійного джерела.

Повний тепловий баланс. Якщо прийняти, що вся енергія випромінювання витрачається на плавлення полімеру, який потім видаляється, то в цьому випадку

$$P(1-R) = vbhp(c\Delta\theta + L_{ie}), \quad (1)$$

де P – потужність діючого на матеріал випромінювання; b – ширина вирізаної зони; L_{ie} – прихована теплота плавлення; h – глибина проріз, c – теплоємність, ρ – щільність матеріалу.

Розподілене поверхневе джерело (одномірний тепловий потік). Для полімерів з високим показником поглинання (наповнених технічним вуглецем) і для яких виконується співвідношення $\delta = \alpha^{-1} \ll (at)^{1/2}$, де δ – глибина проникнення променя; α – показник поглинання випромінювання середовищем; a – температуропровідність; t – час дії випромінювання, теплове джерело можна вважати поверхневим [7]. В цьому випадку розподіл температури в полімері та її зміна в часі визначаються теплопровідністю середовища і описуються наступним рівнянням:

$$\theta(z, t) = \frac{2q(at)^{1/2}}{\lambda_T} \operatorname{ierfc} \frac{z}{2(at)^{1/2}}, \quad (2)$$

де $q = E(1-R)$, ierfc – інтеграл похибок; λ – коефіцієнт теплопровідності.

Температура на поверхні матеріалу

$$\theta(0, t) = \frac{2q}{\lambda_T} \left(\frac{at}{\pi} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Дана модель може бути використана за умови, що радіус лазерного променя набагато більший, ніж розміри поверхні, опроміненої за час t .

Точкове джерело тепла. Розв'язок рівняння теплопровідності за умови відсутності конвекції та радіаційних втрат, та в припущенні, що джере-

ло теплоти є миттєво діючим в точці з координатами (x', y', z') може бути наданий у вигляді:

$$\theta(x, y, z, t) = \frac{Q(x', y', z')}{8(\pi at)^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at}\right), \quad (4)$$

де Q – кількість теплоти, яка виділяється в об'ємі матеріалу.

У випадку симетричного розповсюдження тепла для тонкої пластини $H/4at \ll 1$ справедливе співвідношення:

$$\theta(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda_T H t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right). \quad (5)$$

Для рухомого джерела в тонкій пластині справедливе співвідношення:

$$\theta = \frac{P(1-R)}{2\pi\lambda_T H} K_0\left(\frac{rv}{2a}\right) \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right), \quad (6)$$

де K_0 – функція Бесселя другого роду нульового порядку.

Кругове джерело. Для більшості лазерів імпульс, нормований на одиницю в максимумі, має приблизно одну і ту ж форму, якщо розглядати її як функцію часу, віднесеного до тривалості імпульсу, і може бути охарактеризованим в часі функцією $p(t) = E(t)/E_m$. Як просторовий профіль променя, для якого будуть будуватися температурні криві, доцільно вибрати пучки з Гауссівським розподілом густини потужності $E(r) = E_0 \exp(-r^2/r_0^2)$.

Відповідно, густина поглинаючого поверхневого потоку описується рівнянням:

$$q(r) = q_0 \exp(-r^2/r_0^2). \quad (7)$$

Інтегруючи за часом вираз, можна отримати розв'язок для миттєвого точкового джерела з Гауссівським профілем. Спростити вираз для температури можливо за рахунок співставлення у часі процесу теплонасичення та часу проходження пучком відстані, рівної своєму радіусу (r_0/v). Якщо $vr_0/a \ll 1$, то джерело тепла можна вважати таким, що повільно рухається. В цьому випадку максимальна температура матеріалу досягається в центрі рухомої зони опромінення і її значення мало відрізняється від найбільшого, яке відповідає нерухомому тепловому джерелу:

$$\theta \approx \frac{E(1-R)}{\lambda_T} \left(1 - \frac{vr_0}{4a}\right). \quad (8)$$

Наведений вираз справедливий, якщо $\dot{a} \sim 10^{-1} \tilde{n} \tilde{t}^2 / \tilde{n}$ при швидкостях, менших за 1 см/с та діаметрі променя на поверхні полімеру не більшого за 0,5 мм.

Якщо час r_0/v більший часу прогріву пластини (листа) H^2/a , то температура на поверхні може суттєво залежати від товщини виробу:

$$\theta \approx \frac{E(1-R)r_0^2}{2\lambda_T H} \ln \frac{2,25a}{r_0 v}. \quad (9)$$

Із останнього виразу випливає, що порогова густина потужності, необхідна для досягнення в стаціонарному режимі заданої температури, лінійно зростає зі збільшенням товщини листа H та слабо (логарифмічно) залежить від швидкості руху джерела.

Зі збільшенням швидкості переміщення джерела тепловий ефект дії випромінювання зменшується і максимум температури зміщується до периферії рухомої світлової плями в протилежному напрямку до вектора швидкості. В цьому випадку під час переходу до високих швидкостей, коли $vr_0/a \gg 1$, значення максимальної температури на осі переміщення джерела визначається формулою

$$\theta \approx \left(\frac{8}{\pi}\right)^{1/2} \frac{E(1-R)}{\lambda_T} \left(\frac{ar_0}{v}\right)^{1/2}. \quad (10)$$

Максимальна температура, до якої нагрівається полімер, відповідає температурі поверхні напівпростору при дії імпульсного джерела тепла тривалістю $2r_0/v$, яка відповідає часові проходження рухомим джерелом свого діаметра. Для полімерів $\dot{a} < 10^{-2} \tilde{h}^2/\tilde{h}$ і отже забезпечується умова швидкорухомого джерела $vr_0/a \gg 1$.

Моделювання теплових процесів при трансмісійному лазерному зварюванні листових полімерних матеріалів полягало у розв'язанні задачі формування теплових полів у в'язкопружних полімерних матеріалах при нерухомому та рухомому внутрішньому джерелі теплової енергії. Прийнято, що верхня деталь прозора для лазерного випромінювання, нижня має заданий коефіцієнт поглинання світлового променя, а їх теплофізичні характеристики залежать від температури. Для деяких полімерних матеріалів ця залежність може встановлюватися експериментальним шляхом. Рівняння теплопровідності і визначальні рівняння доповнюються граничними умовами конвективного теплообміну і початковим розподілом температури.

Постановка задачі. Полімерні плівки моделюються як пластини у формі прямокутних паралелепіпедів різної товщини, розташовані одна на одній. Вісь променя лазера направлена перпендикулярно до поверхні пластин, а кругове джерело нагріву розташовано у площині їх контакту.

Початок декартової системи координат знаходиться на перетинанні вісі променя лазера з верхньою поверхнею пластин. Вісь z направлена уздовж вісі променя, вісь x – у площині стику пластин і направлена у бік, протилежний напрямку переміщення променя лазера, а вісь y перпендикулярна до стику. В обраній системі координат,

що рухається разом із променем, пластини переміщуються зі швидкістю зварювання v , а промінь нерухомий.

У математичній моделі процеси теплопереносу при зварюванні описуються квазістаціонарним рівнянням теплопровідності, а теплообмін з навколишнім середовищем і між підобластями полімерного матеріалу у різних фазах – нелінійними граничними умовами теплового балансу. Коефіцієнт температуропровідності – константа, що має в різних підобластях розрахункової області значення, рівні деяким середнім його значенням для конкретної фази металу у відповідній підобласті.

Для спрощення задачі тривимірне квазістаціонарне рівняння теплопровідності усереднимо по координаті y , в результаті чого одержимо:

$$c_{ei} v \frac{\partial \theta}{\partial x} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) - \frac{\lambda_i}{l_\theta^2} (\theta - \theta_a), \quad (11)$$

де ефективна теплоємність обчислюється за формулою:

$$c_{ei} = \begin{cases} c_1 \rho_1 & \theta < \theta_e \\ c_2 \rho_2 \left(1 + \frac{k}{c_2} \frac{\partial f_1(\theta)}{\partial \theta} \right) & \theta_e \leq \theta \leq \theta_{i0} \\ c_3 \rho_3 & \theta_{i0} < \theta \end{cases}. \quad (12)$$

У даному рівнянні індекс $i = 1, 2, 3$ позначає параметри твердої, рідко-твердої й рідкої фаз відповідно; C_p , ρ , λ_i – теплоємність, густина і теплопровідність i -ї фази відповідно; k – питома теплота плавлення; θ_{i0} , θ_e – температури початку й кінця тверднення; $l_\theta = 2\sqrt{a_i \tau}$ – довжина поширення теплової хвилі за час $\tau = 2r_F/v$, r_F – радіус променя у фокальній площині; a_i – температуропровідність i -го середовища; θ_a – характерна температура пластини поза областю усереднення.

Граничні умови задачі виходять із умов теплового балансу. На поверхні $z = 0$ в областях твердого, склоподібного, а також рідкого та двофазного стану умова має вигляд:

$$\lambda_i \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\alpha_k + \alpha_{ri})(\theta|_{z=0} - \theta_{gl}), \quad i=1, 2, 3 \dots \quad (13)$$

Тут α_k – конвективний коефіцієнт тепловіддачі; θ_g – температура газу; α_{ri} – радіаційний коефіцієнт тепловіддачі, що задовольняє співвідношенню

$$\alpha_{ri} = \varepsilon_i \sigma_0 (\theta|_{z=0}^2 + \theta_g^2)(\theta|_{z=0} + \theta_g), \quad (14)$$

де ε_i , σ_0 – приведений ступінь чорноти й константа Стефана-Больцмана відповідно.

Для інтенсивності випромінювання лазера приймаємо нормальний закон розподілу Гаусса, і воно залежить від змінного по z радіуса променя лазера:

$$r_z = \left(r_F^2 + \left(\frac{z - Z_F}{\pi r_F} \lambda_0 \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Тут Z_F – координата по z фокальної площини; r_F – радіус лазерного променя у фокальній площині; λ_0 – довжина хвилі випромінювання лазера.

Для зручності програмної реалізації обчислювального алгоритму і його викладу вся безліч ітерацій у зовнішньому циклі розбита на етапи. Розрахункова область G на першому етапі обчислень – прямокутник в площині стику пластин. Його сторони $z = 0$, $z = h$, $x = -l_1$, $x = l_2$, де l_1 і l_2 – відстані відповідно від лівої й правої границі прямокутника до вісі променя лазера. Вибір величин l_1 і l_2 залежить від потужності лазера й швидкості зварювання.

Апроксимація рівняння. Область розв'язку задачі покрита нерегулярною різницевою сіткою G_h з вузлами (ih_1, ih_2) , $i = 0, 1, \dots, n_1$, $j = 0, 1, \dots, n_2$, де h_1 і h_2 – кроки сітки. Для чисельного розв'язку задачі використані варіанти схеми методу встановлення. Одна з них для рівняння (11) має вид

$$\begin{aligned} & \frac{\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^n}{\tau} + \nu \frac{\theta_{i+1,j}^{n+1} - \theta_{i-1,j}^{n+1}}{2h_1} = \\ & = \alpha_i \left(\frac{\theta_{i+1,j}^{n+1} - 2\theta_{i,j}^{n+1} + \theta_{i-1,j}^{n+1}}{h_1^2} + \frac{\theta_{i,j+1}^n - 2\theta_{i,j}^n + \theta_{i,j-1}^n}{h_2^2} \right) - \\ & - \frac{\alpha_i}{l_0^2} (\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_\alpha). \end{aligned} \quad (16)$$

Крім неї була випробувана також схема умовної апроксимації. Відзначимо, що у розрахунковій області збіжність чисельного розв'язку спостерігалася по збіжності величини

$$\max_{i,j} |\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^n|.$$

При використанні другої схеми додатково спостерігалася величина нев'язки від підстановки різницевого розв'язку в різницеве рівняння теплопровідності й в різницеві умови на границях. При цьому, природно, у них видалялися фіктивні похідні за часом, а похідні по просторових змінних і неоднорідні члени всі виписувалися на останньому часовому шарі. Ітерації припинялися, як тільки ці величини ставали менше деяких заданих величин.

Апроксимація крайових умов. Крайові умови на зовнішній і внутрішній границях (фронтах між фазами матеріалу виробу) апроксимовані з першим порядком. Для запису крайових умов у конкретній точці необхідно мати чисельні значення компонент нормалі, кривизни границі. Оскільки всі внутрішні границі в розглянутій задачі – це певні ізотерми, при необхідності по

обчислених сіткових значеннях температури інтерполяцією знаходяться відповідні границі. Граничні умови також враховували рухливий характер джерела.

Для прискорення ітераційного процесу в усіх різницеві граничні умови штучно додавалася фіктивна різницева похідна за часом від температури. Так само, як і в рівнянні (16), знак при ній вибирався таким, щоб збільшувався модуль елемента на діагоналі у відповідному рядку матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь різницевої задачі.

У процесі проведення однієї поточної ітерації у всій розрахунковій області (глобальної ітерації) система (16) прогонками уздовж вісі x послідовно розв'язується у всіх підобластях. У середині підобластей послідовно перебираються всі можливі в ній значення індексу j . Значення розв'язку на границях усіх підобластей беруться з попередньої ітерації. Після завершення ітерації уточнюються значення розв'язку у всіх вузлах на границі підобластей. У кожному вузлі на границі крайова умова розв'язується відносно значення температури в обраному вузлі. Тим самим знаходиться його уточнене значення через значення температури в сусідніх вузлах, отримані на даній ітерації. Воно й використовується на наступній ітерації в якості значення розв'язку на границі.

У даних розрахунках задовільним вважалося, коли при збільшенні розміру області вдвічі й незалежному здрібнюванні кроків сітки розрахункові величини в областях між фазами відрізнялися не більше, ніж на 3 %. У цій задачі необхідний розмір розрахункової області, природно, залежить насамперед від швидкості зварювання. Чим вона вища, тим більша несиметричність у картині ізотерм відносно вісі променя лазера.

Крім того, вважаючи на специфіку температурної поведінки полімерних матеріалів, теплова обстановка в зоні зварювання повинна строго контролюватися та підтримуватися на заданому рівні. Як показують розрахунки, найбільш критичними параметрами режиму при заданій потужності лазера є швидкість зварювання та ширина температурного інтервалу в'язкотекучого стану $\Delta\theta_{AO}$.

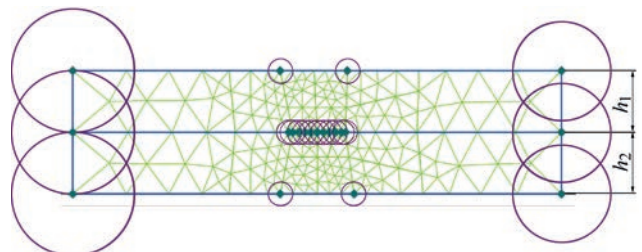


Рис. 1. Скінченно-елементна сітка для розрахунку теплового поля в полімерних плівках при їх лазерному зварюванні

Для чисельної реалізації визначених рівнянь використаний метод скінченних елементів, в основі якого лежить альтернативне формулювання задачі. На рис. 1 показано схему моделі трансмісійного зварювання та нерегулярну скінченно-елементну сітку для розрахунку теплового поля. Початок декартової системи координат розташовано в центрі, окружностями показано різні розміри елементів сітки. Розраховували теплові поля при зварюванні поліетиленових плівок товщиною 0,2...0,5 мм лазером потужністю 10 Вт зі швидкістю 0,01...0,02 м/с.

Аналіз графічних результатів математичного моделювання (рис. 2–5) показує, що при трансмісійному лазерному зварюванні розподіл температури по ширині шва є нерівномірним, що обумовлено Гаусівським розподілом густини потужності в лазерному промені. При заданій потужності лазера більш сприятливі умови для утворення зварного з'єднання виникають у випадку зварювання плівок, верхня з яких має меншу теплопровідність. Зона максимальних температур може зміщуватися за рахунок умов тепловідводу від зони з'єднання. Оптимальними умовами для утворення якісного зварного з'єднання є умови, за яких зона максимальних температур локалізується в області контакту зварюваних плівок. Співставлення результатів теоретичного та експериментального досліджень показує, що при заданих параметрах режиму неперервного зварювання оптимальною швидкістю є така відносна швидкість, при якій досягається прогрів на глибину не менш, ніж 2/3 товщини кожної деталі, рахуючи від площини їх фізичного контакту.

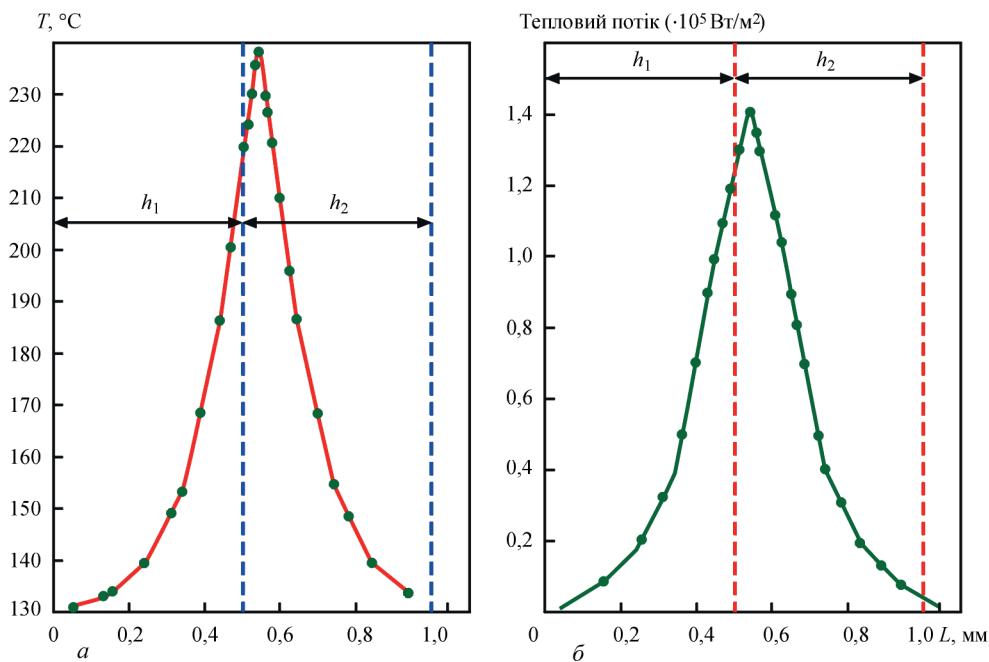


Рис. 3. Розподіл температури (а) та тепловий потік (б) по товщині в зоні з'єднання плівок

На рис. 6 показано загальний вигляд швів, отриманих з лазерним зварюванням з врахуванням результатів математичного моделювання термомеханічних процесів.

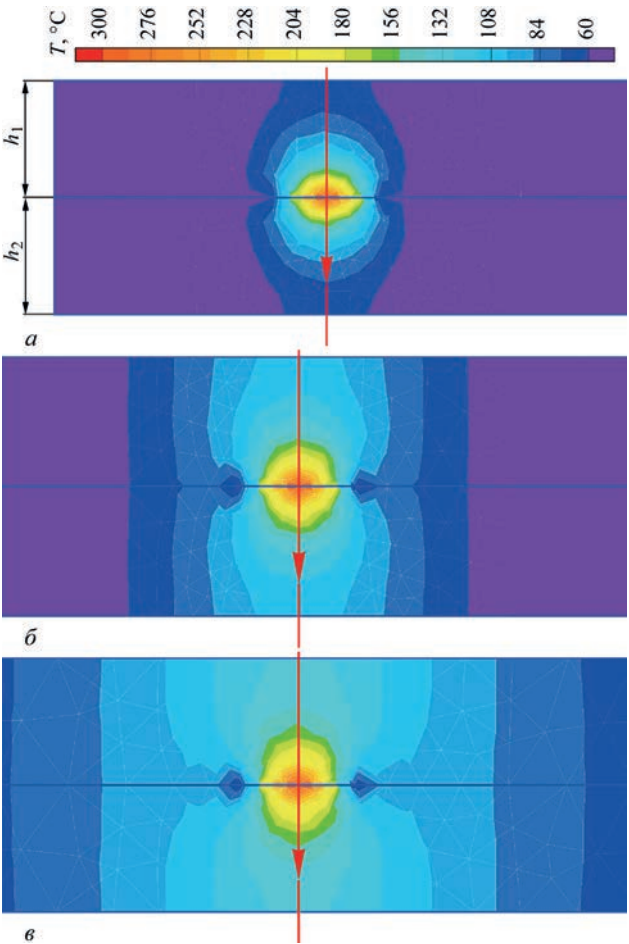


Рис. 2. Еволюція температурного поля в полімерних плівках під час їх лазерного зварювання (статичний нагрів) а – $t = 1$ с; б – 3; в – 10. Стрілкою показано напрямок променю лазера (вісь координат Y)

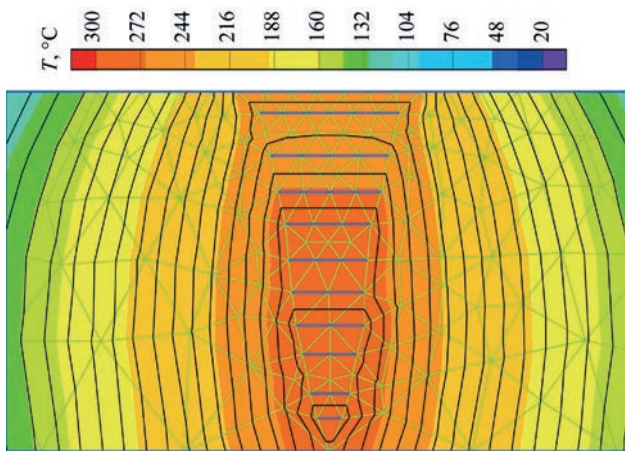


Рис. 4. Переріз розрахункової зони площиною, що перпендикулярна вісі x в точці з максимальною шириною зони термічного впливу (Гауссовий розподіл потужності в промені лазера).

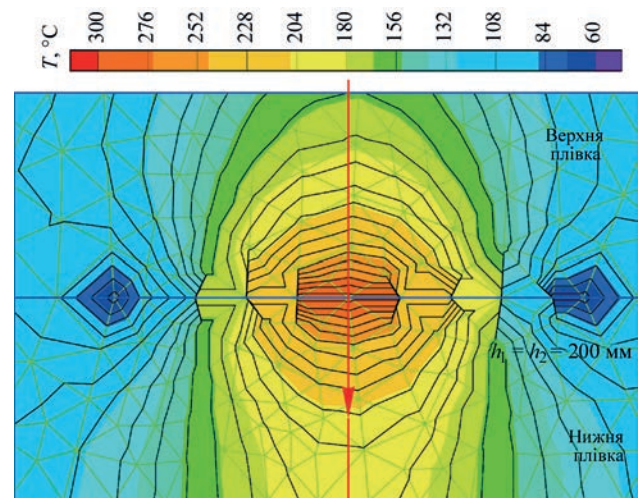


Рис. 5. Поле температур та ізоТЕРМИ в розрахунковій області. Стрілкою показано напрямок променю лазера (вісь координат Y)

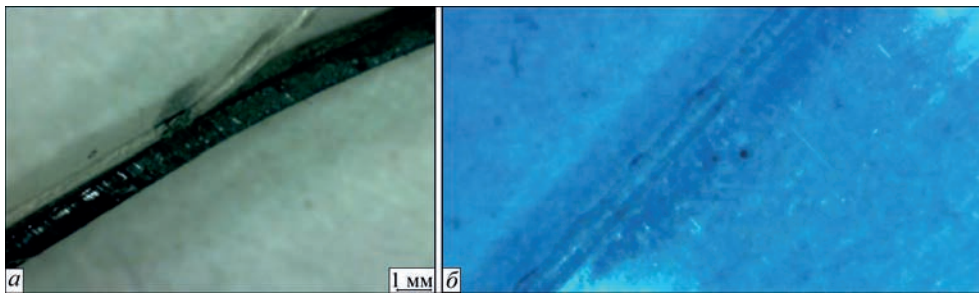


Рис. 6. Загальний вигляд зварних швів, отриманих з використанням лазерного зварювання: a – шов прозорої поліетиленової плівки товщиною 0,5 мм, рівномірний з основним матеріалом; b – герметичний шов модифікованої медичної плівки товщиною 0,2 мм

Висновки

Проведено моделювання теплових процесів при трансмісійному лазерному зварюванні листових полімерних матеріалів. Сформульовано основні рівняння для описання виділення тепла при дії випромінювання на поверхню для можливих моделей повного теплового балансу; точкового теплового джерела; кругового джерела; лінійного джерела. Запропоновано математичну модель процесу теплопереносу при зварюванні, що описуються квазістаціонарним рівнянням теплопровідності та нелінійними граничними умовами теплового балансу. Для чисельного розв'язання визначених рівнянь використаний метод скінченних елементів.

Результати математичного моделювання дозволили дослідити особливості формування теплових полів при трансмісійному лазерному зварюванні полімерних плівок при різних параметрах режиму зварювання. Показано, як в залежності від потужності та швидкості переміщення джерела випромінювання можна регулювати теплову обстановку в зоні з'єднання полімерів з врахуванням їх поглинаючих властивостей, температур в'язкоплинного переходу, теплофізичних властивостей матеріалу, умов теплообміну та інших параметрів.

Список літератури/References

1. Klein, R. (2011) *Laser welding of plastics*. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co.

2. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., Saprionova, A. (2018) Development of epoxy-polyester composite with improved thermophysical properties for restoration of details of sea and river transport. *Advances in Materials Science and Engineering*, 6378782, available at: <https://doi.org/10.1155/2018/6378782>.
3. Acherjee, B., Kuar, A.S., Misra, D., Mitra, S. (2011) Laser transmission welding of thermoplastics: An overview of experimental findings – process, development and applications. *Journal of Manufacturing Technology Research.*, 3, 211–236.
4. Kneip, J.C., Martin, B., Loredo, A. et al. (2004) Heat transfer in semitransparent materials during laser interaction. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156, 1805–1809, available at: <https://doi.org/10.1016/J.JMAT-PROTEC.2004.04.380>
5. Ruotsalainen, S., Laakso, P., Kujanpa, V. (2015) Laser welding of transparent polymers by using quasi-simultaneous beam off-setting scanning technique. *Physica Procedia*, 78, 272–284.
6. Majumdar, A., D'Alvise, L. (2016) Simulation of the laser transmission welding of thermoplastics – oSensitivity to process parameters. *Proceedings of the NAFEMS Nordic Conference* available at: <https://www.researchgate.net/publication/304308496>
7. Делоне Н.Б. (1989) *Взаимодействие лазерного излучения с веществом*. Москва, Наука.
Delone N.B. (1989) *Interaction of laser radiation with substance*. Moscow, Nauka [in Russian].
8. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. (1985) *Физические процессы при лазерной обработке материалов*. Москва, Энергоатомиздат.
Vedenov, A.A., Gladush, G.G. (1985) *Physical processes in laser treatment of materials*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
9. Кутателадзе С.С. (1979) *Основы теории теплообмена*. Москва, Атомиздат.
Kutateladze, S.S. (1979) *Fundamentals of the theory of heat exchange*. Moscow, Atomizdat [in Russian].
10. Лыков А.В. (1967) *Теория теплопроводности*. Москва, Высш. шк.
Lykov, A.V. (1967) *Theory of heat conductivity*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].

MODELLING OF THERMAL PROCESSES IN LASER WELDING OF POLYMERS

M.G. Korab¹, M.V. Iurzhenko¹, A.V. Vashchuk¹, I.K. Senchenkov²¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kyiv.ua

²S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of NAS of Ukraine, Nesterov Str. 3, Kyiv, 02000, Ukraine

In the work, a mathematical description of thermal processes in laser welding with the use of the classical theory of thermal conductivity was performed. The thermal cycle under the action of radiation on the surface was analyzed using the models of overall heat balance, distributed surface, point, circular and linear heat sources. The modeling of welding process consisted in solving the problem of forming thermal fields in viscoelastic polymeric materials at a moving inner heat source. It was assumed that the upper part is transparent to laser radiation and the lower one has a set coefficient of light beam absorption, and their thermophysical characteristics depend on temperature. The equations of thermal conductivity and defining equations were formulated, supplemented by the boundary conditions of convective heat transfer and the initial temperature distribution. For the numerical implementation of certain equations the finite element method was used, which is based on an alternative formulation of the problem. The results of mathematical modeling showed the peculiarities of the formation of thermal fields in the transmission laser welding of polymer films at different parameters of welding mode. 10 Ref., 6 Fig.

Keywords: laser welding, polymer films, mathematical modeling, thermal processes, temperature fields, isotherms

Надійшла до редакції 20.09.2021

Данина пам'яті

4 жовтня 2021 р. у Києві на фасаді Головного корпусу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України встановлено оновлену меморіальну дошку видатному інженеру, вченому в галузі мостобудування та електрозварювання, академіку, віце-президенту Академії наук УРСР, заслуженому діячеві науки УРСР, педагогу, організатору науки та виробництва, громадському діячеві – Євгену Оскаровичу Патону.

Є.О. Патон був фундатором нового наукового напрямку – електрозварювання та ініціатором широкого впровадження його у зварювальне виробництво. За його ініціативи 1 січня 1934 р. засновано перший в світі спеціалізований науковий зварювальний центр – Інститут електрозварювання, директором якого він був до кінця життя – 12 серпня 1953 р.

Ідею Є.О. Патона щодо «зустрічі електрозварювання з мостобудуванням» вдало відобразив автор меморіальної дошки – відомий скульптор С.С. Беляєв, який багато років співпрацює з Інститутом електрозварювання. На меморіальній дошці погляд видатного мостобудівника, всесвітньо відомого вченого в галузі електрозварювання, академіка Є.О. Патона спрямований на своє унікальне творіння – перший в Європі суцільнозварний міст через Дніпро. Обличчя Євгена Оскаровича передає його внутрішню сутність – мудрість, цілеспрямованість та оптимістичний погляд у майбутнє.

Діяльність Євгена Оскаровича Патона – вченого і талановитого інженера, організатора науки і виробництва, назавжди залишиться в історії світової науки і техніки.



ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБ ЗІ СТАЛІ МАРКИ ASTM A106/API 5L З ВИКОРИСТАННЯМ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ МАГНІТОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ

В.С. Качинський¹, Yupiter HP Manurung²

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

²Smart Manufacturing Research Institute (SMRI) and School of Mechanical Engineering, UiTM Shah Alam, Malaysia

Пресове зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) – це зварювальний процес, який застосовується для з'єднання труб із зовнішнім магнітним полем, що впливає на пересування дуги в вузькому зазорі між торцями труб. Цей процес зварювання складається з складної взаємодії між електричною дугою, зовнішнім магнітним полем та величиною осадки. У цій роботі проводилися дослідження по ПЗМД зварюванню безшовних труб з вуглецевої сталі марки ASTM A106/API 5L, яка використовується на електростанціях, котлах, нафтохімічних заводах, нафтогазопереробних заводах і судах, на яких трубопровід повинен транспортувати рідини і гази під високим тиском і температурою. Експериментальна процедура включає низку випробувань для розробки та оцінки бази знань щодо ПЗМД зварювання безшовних труб. Далі проводяться механічні випробування зварних з'єднань МІАВ зразка ASTM A106/API 5L для оцінки його міцності та оцінки цілісності зварного шва відповідно до стандарту API 1104. На додаток до дослідження розроблено та представлено концептуальну специфікацію процедури зварювання для ПЗМД та протокол кваліфікації зварювальних процедур для зварювання труб та подальшого застосування. Результати експерименту підкреслювали, що зварні ПЗМД з'єднання демонструють високу міцність і хорошу цілісність зварного шва на рівні основного металу труби. Отже, ПЗМД можна розглядати як майбутній швидкий та економічний процес зварювання без дорогого використання присадних матеріалів та захисного газу. Бібліогр. 15, табл. 5, рис. 10.

Ключові слова: пресове зварювання, магнітно-керована дуга, безшовні труби, вуглецева сталь, зварні з'єднання, механічні властивості

Пресове зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) встик – це вдосконалений процес зварювання, який є альтернативою таким зварювальним процесам, як тертя, опір і стикове контактне зварювання. ПЗМД – це твердотільний процес стикового пресового зварювання під тиском сталевих труб і трубчастих деталей [1–3]. У цьому процесі вирівняні затиснуті в машині осі труб, торці яких нагріваються дугою, яка обертається в зазорі між двома трубами. Формування дуги та її швидкість обертання контролюються магнітною силою радіальної складової індукції керуючого магнітного поля в зазорі. Була розроблена схема магнітного контролю руху зварювальної дуги у вузькому зазорі зварних труб. Дуга нагріває торці труб, викликаючи локалізовану невелику смугу плавлення та сусіднього пом'якшення в зоні термічного впливу (ЗТВ), а згодом труби осаджують між собою для отримання зварного з'єднання [4].

При ПЗМД зварюванні зовнішнє кероване магнітне поле переміщує дугу в зазорі між краями труб, як показано на рис. 1. Дві труби, готові до зварювання, встановлені коаксіально. Магнітні системи, встановлені навпроти один одного, утворюють магнітні потоки в дуговому зазорі. Шляхом короткого замикання збуджується зварюваль-

на дуга. Зварювані труби розсуваються на певний дуговий зазор (від 1,5 до 2,1 мм). Взаємодія між осьюовою складовою струму зварювальної дуги та радіальною магнітною складовою, спрямованою перпендикулярно струму зварювальної дуги, призводить до створення сили. Ця сила переміщує зварювальну дугу вздовж торців труб. Зварювання ПЗМД використовує заздалегідь запрограмоване управління струмом дуги з рухом дуги, яке може досягати лінійної швидкості 270 м/с. Цим досягається рівномірне нагрівання торців труб, забезпечуючи таким чином якісне зварне з'єднання. У цьому дослідженні модель машини МД 101 та МД 205, розробленої в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, як показано на рис. 2, використовувалася для зварювання безшовних труб, які працюють при високих температурах.

Визначення відповідних комбінацій параметрів зварювання для якості та міцності зварного шва може бути тривалим процесом, пов'язаним із сут-

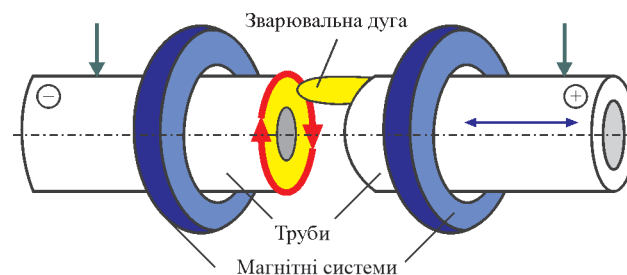


Рис. 1. Схема процесу ПЗМД зварювання



Рис. 2. Машина МД-101 для ПЗМД зварювання труб

тевим методом проб і помилок, починаючи з аналізу попередньої специфікації процедури зварювання, а потім виготовлення зварного тестового з'єднання для виконання неруйнівних та руйнівних випробувань, таких як макро- та мікротравлення для металографічних досліджень та випробування на розрив. Специфікація процедури зварювання (СПЗ) для ПЗМД встановлюється на підставі сертифіката про схвалення зварювальної процедури, підписаного уповноваженою особою, такою як інженер зі зварювання і доповненого до кваліфікаційного запису процедури зварювання матеріалу, що зварюється [5]. У виробництві зварних з'єднань письмова специфікація процедури зварювання є «рецептом» виробництва певної якості зварного шва, відповідає стандартним вимогам до виготовлення, таким як у API 1104.

Деякі роботи були проведені в області ПЗМД зварювання. Оскільки цей процес вважається відносно новим процесом, існує дуже мало літератури, що стосується процесу ПЗМД зварювання для використання на електростанціях, котлах, нафтохімічних заводах, нафтогазопереробних заводах і судах, на яких трубопровід повинен транспортувати рідини і гази під високим тиском і температурою. Taneko A. та ін. [6] використовували детектор напруги в різних місцях всередині труби з легованої сталі, осцилограф та високошвидкісну відеокамеру для вимірювання швидкостей дуги та кутів дуги. Зокрема, вони вивчали взаємозв'язок між швидкістю дуги, кутом дуги та положенням, у якому живлення подається до труб. Вони дійшли висновку, що через вплив дуги та низький електричний опір труби, струм дуги збільшується ближче до роз'єму кріплення на трубі. Leigh F. та ін. [7] представив нову перспективу від проекту розвитку впровадження технології в галузі будівництва нових трубопроводів в Австралії. У цьому дослідженні був спроектований і побудований прототип зварювального апарату ПЗМД, здатний зварювати трубопроводи природного газу діаметром 150 мм, що відповідають вимогам до австралійського стандарту нафтопрово-

ду AS2885.2. Результати досліджень, проведених Качинським В.С. та ін. [8], показали доцільність практичного застосування ПЗМД для зварювання труб та трубопроводів зі сталі X70. Edson D. [9] окреслив типові промислові застосування в автомобільній промисловості – зварювання МІАВ для зварювання деталей в кожусі задньої осі автомобіля Ford Transit, що містить два кругових і два квадратних стикових шва. Дослідження Качинського В.С. та ін. [10] представили результати зварюваності автомобільних деталей. Було досліджено можливість зварювання компактних порожніх автомобільних деталей, таких як кермовий стрижень діаметром 22×2,2 мм, амортизатор діаметром 40×2,2 мм. З 1994 р. пневматичні пружини та амортизатори, зварені ПЗМД, виготовлялися на автомобільних заводах, на яких було виготовлено понад 7,4 млн зварних з'єднань.

Використання ПЗМД зварювання у виробництві комплектуючих для кабін вантажівок компанії Thyssen Krupp Automotive Systems описано Hiller F. та ін. [11]. Jenicek A. та ін. [12] продемонстрували, що трубчасті порожнисті тіла, такі як гайки, гільзи та втулки, можна прикріпити до листів за допомогою процесу з особливою економічною вигідністю. З розширеними пристроями для зварювання дугоподібними шпильками алюмінієві компоненти з внутрішньою різьбою між М8 та М24 приварювали до перфорованих листів. Mogi S. та ін. [13] оцінили доцільність процесу ПЗМД зварювання з алюмінієвими та алюмінієво-мідними з'єднаннями. У цій структурі було складно досягти необхідної щільності магнітного потоку в стику з кольоровими матеріалами порівняно з чорними. Тому всередину труби часто вставляли феромагнітний стрижень. У дослідженні повідомляється про метод ПЗМД, розроблений для зварювання неферомагнітних ме-

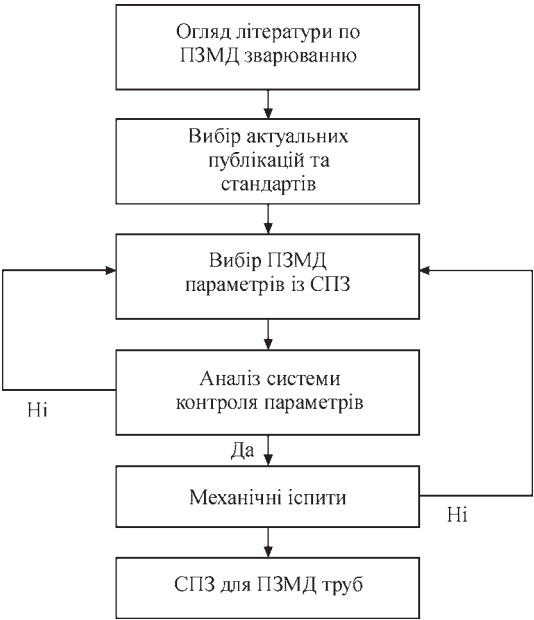


Рис. 3. Блок-схема дослідження

талів, і досліджуються умови та методи стикового зварювання труб малого діаметра з алюмінію до алюмінію (Al–Al) та до міді (Al–Cu).

В роботі представлені результати проведених досліджень ПЗМД зварювання безшовних труб ASTM A106/API 5L діаметром від 42 до 200 мм з вуглецевої сталі для високотемпературного обслуговування та виробництва, які мали на меті розробити специфікацію параметрів зварювання для високотемпературних безшовних труб за допомогою ПЗМД зварювання. Блок-схема дослідження представлена на рис. 3.

Ідентифікація параметрів ПЗМД процесу для ASTM A106/API 5L. Безшовна труба ASTM A106/API 5L класу B, яка працює під тиском. У цьому дослідженні було використано матеріал ASTM A106/API 5L класу B. Він був спеціально розроблений для використання на електростанціях, котлах, нафтохімічних заводах, нафтогазових заводах та суднах, де трубопроводи повинні транспортувати рідини та гази, що мають високий тиск і температуру. Цей матеріал підходить для згинання, фланцювання та подібних операцій формування. Механічні властивості та хімічний склад цього матеріалу представлені у табл. 1 та 2 відповідно.

Попередня специфікація процедури зварювання. Попередня специфікація процедури зварювання є важливим етапом у розробці СПЗ. Це документ,

що містить необхідні змінні процедури зварювання, які необхідно кваліфікувати, щоб створити кваліфіковану специфікацію процедури зварювання. На цьому етапі вибір струму, часу, тиск осадки та дугового зазору в основному здійснюється шляхом проб і помилок на зварювальній машині. Інженер-дослідник також посилається на рекомендації виробника щодо параметрів. Спочатку проводиться візуальний огляд зварного з'єднання для п'яти наборів параметрів процесу. Загальні спостереження для кожного випробування наведено в табл. 3.

Результат показує, що хороший зварний шов з рівномірним проникненням досягається у випадку зварювання 5, як показано на рис. 4.

Результат механічних випробувань. Механічні випробування, такі як випробування на розтяг, вигин, розрив, твердість та макротравлення, проводилися відповідно до стандарту API 1104 [14]. Результати випробування на розрив наведено в табл. 4. Вони показують, що міцність зразка становить 459,88 МПа, що відповідає міцності основного металу труби 415 МПа, а зразок розірвався по основному металу, як показано на рис. 5. Абсолютно прийнятні результати довели, що параметри ПЗМД зварювання, використовувані для зварювання ASTM A106/API 5L, підібрані технологічно правильно.

Результати випробування на бічний вигин для визначення міцності зварного з'єднання труб на-

Таблиця 1. Механічні властивості сталі ASTM A106/API 5L

Діаметр, мм	Товщина стінки, мм	Межа міцності, МПа	Межа плинності, МПа	Подовження, %
42,7	3,83	415	294	31
114,3	6,02	423	305	37
168,3	10,00	429	309	39

Таблиця 2. Хімічний склад сталі ASTM A106/API 5L, мас. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
0,28	0,25	1,20	0,030	0,030	0,50	0,50	0,50	0,15



Рис. 4. Рівномірне формування зварного з'єднання

Таблиця 3. Пробне спостереження за зварними з'єднаннями труб марки ASTM A106/API 5L

Номер дослідження	Струм, А			Час зварювання, с				Тиск осадки, бар	Дуговий зазор, мм	Візуальний контроль
	I ₁	I ₂	I ₃	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄			
1	230	170	500	1	2,75	10,5	0,18	4,5	1,4...1,6	Нерівномірне підсилення зварного з'єднання
2	230	180	520	1	2,6	10,5	0,2	4,4	1,4...1,6	Надлишок видавленого металу в зварному шві
3	230	190	550	1	2,6	9,0	0,2	4,3	1,4...1,6	«-»
4	230	210	570	1	2,5	8,5	0,3	4,3	1,4...1,6	«-»
5	230	215	600	1	2,5	8,0	0,3	4,2	1,4...1,6	Якісний шов, рівномірне підсилення

Таблиця 4. Результат випробування на розрив зварного з'єднання труб марки ASTM A106/API 5L

Зовнішній діаметр, мм	42,7	114,3	168,3
Товщина, мм	3,83	6,02	10,00
Площа перерізу, мм²	467	2048	4971
Межа плинності, МПа	344,93	351,28	354,37
Межа міцності, МПа	459,88	448,93	461,84

Таблиця 5. Результати випробувань на згин внутрішньої та зовнішньої поверхонь ASTM A106/API 5L

Ширина, мм	Товщина, мм	Результати іспитів	Замітки
25,0	3,83	Задовільні	Тріщина на стику відсутня
12,0	10,00	—»—	«-»



Рис. 5. Випробування зварного зразка труби на розрив

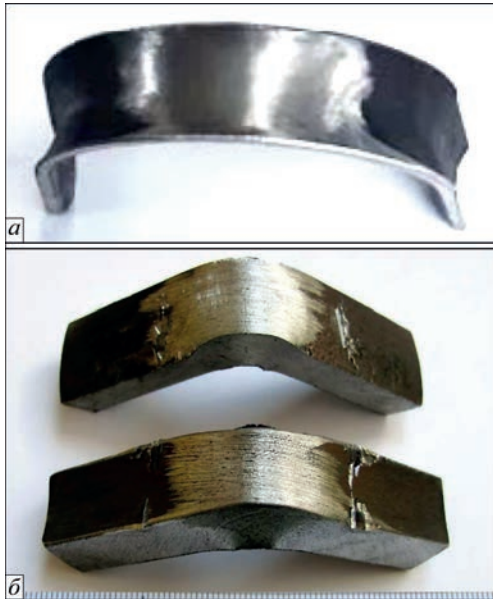


Рис. 6. Випробування з внутрішнього та зовнішнього вигинів зварного зразка: а – труба діаметром 42,7×3,83 мм; б – 168,3×10,00 мм

ведено в табл. 5. Як видно на рис. 6, зразок знаходиться у відмінному стані без ознак тріщини або дефектів у зоні згину.

Для оцінки розривів та дефектів зварного зразка було проведено випробування на злом. Як можна побачити на рис. 7, зразок знаходиться у належному стані, без пористості та з відсутністю несплавлення на відкритій поверхні зварного шва.

Метод перевірки твердості проводили згідно з ASTM E92. Вимірювання було зроблено у зварному шві, ЗТВ та основному металі за допомогою методу Віккерса $HV 10$, як показано на рис. 8. Виміряні значення твердості на зразках для випробування наступні:

Зварний шов – $HV 10$ – 183...232

ЗТВ – $HV 10$ – 153...170

Основний метал – $HV 10$ – 145...169



Рис. 7. Випробування на злом зварного зразка труби

Ці результати значень довели, що зварне з'єднання виконується з використанням оптимально підібраних параметрів ПЗМД зварювання [15].

Для металографічних випробувань зразок був підготовлений і витравлений з однієї сторони відповідно до API 1104. Зі спостереження це свідчить про те, що зразок був повністю сплавленим і вільним від тріщини, як представлено на рис. 9.

Результати та обговорення. Для фактичного запису параметрів процесу ПЗМД, застосованих для цілей тестування, було проведено запис процедури зварювання. З візуальних та механічних випробувань запис процедури зварювання був далі розроблений у специфікацію процедури зварювання. У робочому середовищі ці параметри змінюються залежно від багатьох факторів. Отже, у СПЗ параметри були вказані в діапазоні, який все одно забезпечував би найкраще зварювання для цього матеріалу. На рис. 10 представлено параметри СПЗ, розробленої для труб з матеріалу ASTM A106/API 5L.

Ця інформація є корисна при проектуванні трубопроводів, коли інженери часто стикаються з труднощами у виборі процесу зварювання, вона допоможе встановити придатність ПЗМД для трубної промисловості. Наведені параметри зварювання та дані про виробництво будуть корисними для застосування методів зварювання труб у практичній ситуації. Крім того, це допоможе інженерам уникнути помилок, які можуть бути дорогими, або подолати проблеми, коли на виробництві виникає дефект зварювання.

Зварювальний струм при ПЗМД можна розділити на три етапи, а час зварювання – у чотири етапи. Для зварювання ASTM A106/API 5L труб діаметром 42,2 мм з товщиною стінки 3,56 мм струм I1 використовується протягом приблизно 1 с, протягом якої зварювальні труби короткочасно стискаються до короткого замикання та вклю-

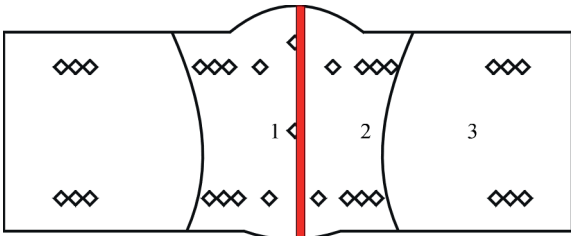


Рис. 8. Результати випробувань зварного зразка на твердість за Віккерсом: 1 – зварний шов; 2 – ЗТВ; 3 – основний метал



Рис. 9. Макрошліф зварного з'єднання

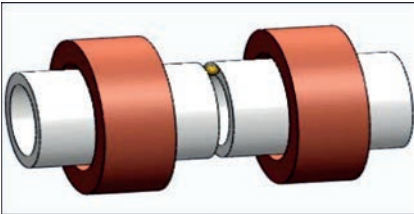
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України					
Специфікація процедури ПЗМД зварювання					
Специфікація: API 1104 Процес зварювання: Пресове зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) Марка сталі: ASTM A106/API 5L Група: клас Б Модель ПЗМД машини: МД-101, МД-205			ПЗМД СПЗ №: ІЕЗ СПЗ/ПЗМД – 001 Метод процесу: Автоматичний Мета СПЗ: Процедура для вуглецевих сталей Діаметр труби: 40...200 мм Товщина стінки: 3?5...10 мм		
Конфігурація з'єднання			Деталі з'єднання		
					
Характеристика з'єднання			Захисні гази та матеріали		
Тип з'єднання: стикове з'єднання			Захисні гази: не використовуються Зовнішній обдув: не використовується Внутрішній продув: не використовується Зварювальна проволока: не використовується		
Зварювальні параметри для труб діаметром 42,7 мм					
Номер етапу	Зварювальний струм, А	Час зварювання t, с	Напруга дуги, В	Дуговий зазор, мм	Зусилля осадки, кН
1	220...240	2,5...2,7	24...27	1,6...1,8	41...44
2	180...190	10...12			
3	570...610	0,2...0,4			
Підготовлено: _____			Сертифіковано: _____		
Дата: _____			Дата: _____		

Рис. 10. СПЗ для ПЗМД зварювання

часться зварювальний випрямляч. Т2 (2,4...2,6 с) – це проміжок часу, протягом якого короткозамкнені торці труб відводяться на дуговий зазор, після чого між ними збуджується дуга. Крім того, на цьому етапі часу дуга починає прискорювати обертання в зазорі вздовж торців труб. За цей період часу використовується струм І1 (220...240 А). На стадії Т3 (7...9 с) дуга прискорюється і обертається з відносно високою швидкістю вздовж торців труб, нагріваючи при цьому поверхні торців труб до температури пластичної деформації на глибину 4...7 мм. Під час стадії Т3 подається струм 180...190 А (струм І2). Цикл зварювання завершується осадкою, яка відбувається в час Т4 (0,2...0,4 с), подаючи підвищений струм 590...610 А. Загальний час ПЗМД зварювання для цього зразка становить близько 10...12 с.

За результатами механічних випробувань та металургійного спостереження зварного ПЗМД з'єднання (параметр процесу згідно п'ятого випробування в табл. 3) можна зрозуміти, що якість, міцність і твердість знаходяться в допустимих межах відповідно до застосування в промисловості України та інших країн. Ці результати чітко підкреслюють, що ПЗМД підходить для зварювання високотемпературних безшовних труб.

Висновок

У цьому дослідженні для зварювання сталевих труби марки ASTM A106/API 5L застосовували процес ПЗМД, який зазвичай використовується у високотемпературних умовах. Якість перевіряли візуально та механічно випробували, щоб переконатися у якості зварного шва. Специфікація процесу зварювання була розроблена для застосування цього процесу до робочого середовища відповідно до стандарту України та інших країн. З цього дослідження робиться такий висновок:

- за допомогою процесу ПЗМД час зварювання можна скоротити на 80 % порівняно зі звичайним процесом зварювання;
- ПЗМД вимагає простої підготовки поверхні і не потребує будь-якої обробки;
- обертання дуги під час нагрівання на повітрі забезпечує очищення зварювальної поверхні, забезпечуючи таким чином якість зварювання;
- для зварювання ПЗМД було розроблено СПЗ;
- процес ПЗМД зварювання відповідає стандарту API 1104, який використовується при зварюванні трубопроводів у різних країнах.

Список літератури/References

1. Ganovski, FJ (1974) The magnetarc welding process. *Welding and Metal Fabrication*, 206–213.

- Kachinskiy, V. (2012) Magnetically-impelled arc butt welding for manufacture of hollow parts of mass production. *Welding Technology Journal Japan*, 60
- Kuchuk-Yatsenko, S.I., Ignatenko, V.Yu., Kachinskiy, V.S. (1998) Investigation of the quality of joints of pipes from heat-resistant and hardening steels made by pressure welding with arc heating controlled by a magnetic field. *Automatic Welding*, 6.
- Kachinskiy, V.S., Krivenko, V.G., Ignatenko, V.Yu. (2002) Magnetically impelled arc butt welding of hollow and solid parts. *International Institute of Welding*, III-1208-02. *Welding in the world*, 46, 7/8.
- Dahia, A., Muhd, F., Norridzwan, N., Yupiter, HPM (2018) Parameters identification for weld quality, strength and fatigue life enhancement on HSLA (S460G2+M) using Manual GMAW followed by HFMI/PIT. *Journal of Mechanical Engineering*, SI 5 (4), 205–222.
- Taneko, A., Fumiho, A., Kenji, T., (1986) Analysis of arc rotation velocity in magnetically impelled arc butt welding. *Welding International Journal*, 4, 247–253.
- Leigh, F., Cec, S., Gabriel, S. (2003) MIAB welding: breakthrough technology for high productivity field welding of pipelines. *APIA National Convention Pipelines – Yesterday, Today and Tomorrow Convened by the Australian Pipeline Industry Association*.
- Kachinskiy, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Ignatenko, V.Yu., Koval, MP. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of pipes of steel X70. *Australasian welding journal*, Volume. 55, Second Quarter.
- Edson, D.A. (1982) *Magnetically impelled arc faying surfaces welding of thick wall tubes*. International Institute of Welding, IM-726–82.
- Kachinskiy, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Ignatenko, V.Yu. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of automobile parts. *Australasian welding journal*. Vol. 55, Second Quarter.
- Hiller, F., Schmidt, M., Breiksch, J. (2003) Use of the magnetarc welding process in the production of truck cab suspension systems. *ThyssenKrupp Techforum*, 40–43.
- Jenicek, Cramer, Bush, H. (2005) Weld on aluminium materials: A further development for joining of small hollow bodies using a magnetically impelled arc. *Welding and Cutting*, 4, 10–14.
- Mori, S., Yasuda, K. (1990) Magnetically impelled arc butt welding of aluminum pipes. *Trans Japan Weld Society*, 21, 3–10.
- API STANDARD 1104 (2013) *Welding of pipelines and related facilities*. American Petroleum Institute.
- Cvetkovski, S., Slavkov, D., Magdeski, J. (2003) Welding procedure specification for arc welding of St 52-3N steel plates with covered electrodes. *Proceeding of 3rd BMC*, 152–160.

INVESTIGATIONS OF THE QUALITY OF WELDED JOINTS OF PIPES FROM STEEL OF ASTM A106/API 5L GRADE, USING MAGNETICALLY IMPELLED ARC BUTT WELDING

V.S. Kachinskiy¹, Yupiter HP Manurung²

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

E-mail: office.paton@kiev.ua

²Smart Manufacturing Research Institute (SMRI) and School of Mechanical Engineering, UiTM Shah Alam, Malaysia

Magnetically-impelled arc butt welding (MIAB) is a welding process applied for joining pipes with an external magnetic field, which influences the arc displacement in a narrow gap between the pipe end faces. This welding process consists of a complex interaction between the electric arc, external magnetic field and upset value. In this work, investigations were performed on MIAB welding of seamless pipes from carbon steel of ASTM A106/API 5L grade, which is used in electric power plants, boilers, petrochemical plants, petroleum processing plants and ships, where the pipeline should transport liquids and gases under high pressure and temperature. The experimental procedure includes a range of tests for development and assessment of the knowledge base on MIAB welding of seamless pipes. Then mechanical testing of MIAB welded joints of ASTM A106/API 5L sample to assess its strength and weld integrity in keeping with API 1104 standard. In addition to investigations, a conceptual specification of MIAB welding procedure and protocol of welding procedure qualification for welding pipes and their further application were developed and presented. The experimental results emphasized that the MIAB welded joints demonstrate the high strength and good integrity of the weld on the level of the pipe base metal. Thus, MIAB welding can be regarded as the future fast and cost-effective welding process without expensive use of filler materials and shielding gas. 15 Ref., 5 Tabl., 10 Fig.

Keywords: press welding, magnetically-impelled arc, seamless pipes, carbon steel, welded joints, mechanical properties

Надійшла до редакції 21.09.2021

Данина пам'яті

11 жовтня відбулося відкриття на фасаді четвертого корпусу ІЕЗ ім. Є.О. Патона меморіальної дошки академіку Національної академії наук України Сергію Івановичу Кучуку-Яценку, видатному вченому в галузі зварювання, заслуженому діячу науки і техніки України, лауреату численних державних премій та нагород, заступнику директора ІЕЗ, заступнику і головному редактору журналу «Автоматичне зварювання».

На відкритті були присутні співробітники інституту, учні, найближчі колеги С.І. Кучука-Яценка, а також рідний онук Сергій. Із спогадами про Сергія Івановича виступили академіки НАН України Кривцун І.В., Лобанов Л.М., Петров В.В., член-кореспондент НАН України Шаповалов В.О., Зяхор І.В., представник ПАТ «Укрзалізниця» Яковлев В.О. Всі виступаючі відзначили талант вченого, його проривні досягнення у галузі зварювання залізничних рейок, трубопроводів, елементів ракетної техніки, видатні новаторські здібності, енергію, турботу про молодих вчених, самовідданість науці та праці.

І.В. Кривцун висловив побажання, щоб соратники, учні та представники молодого покоління інституту продовжили справу всього життя Сергія Івановича і примножили її новими досягненнями.



ЗАСТОСУВАННЯ SLM-ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕНТАЛЬНИХ ІМПЛАНТІВ ЗІ СПЛАВУ Ti–6Al–4V

С.В. Аджамський¹, Г.А. Кононенко^{1,2}, Р.В. Подольський^{1,2}

¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, м. Дніпро, вул. Рибинська, 144. E-mail: info@alt-print.com

^{1,2}Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49107, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

На сьогоднішній день SLM-технологія знайшла застосування в різних галузях, в тому числі й в стоматологічній. Виготовлення дентальних імплантів за SLM має значні переваги. Метою роботи була розробка та виготовлення обладнання, відпрацювання режимів друку за технологією SLM та електрохімічного полірування дентальних імплантів з Ti–6Al–4V. В роботі використовували титановий сплав Ti–6Al–4V хімічного складу, мас. %: 6,21 Al; 4,03 V; 0,04 Fe; 0,1 C; 0,7 O; 0,02 N; Ti – база. Вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа PEM-106, мікроструктура – CarlZeiss AxioVert 200M mat. Контроль ваги – аналітичні ваги АДВ-2000. Електрохімічне полірування виконували у розчині плавикової кислоти (HF), азотної кислоти (HNO₃) з гліцерином (C₃H₈O₃). Розроблено та виготовлено надкомпактний 3D-принтер Alfa-150D з розміром робочого поля 150×150×180 мм. Принтер оснащений високоточним ітербієвим лазером з повітряним охолодженням з потужністю 200 Вт. Точність позиціонування лазерного променя – 0,15 мкм. Товщина робочого шару – 20...100 мкм. Виготовлені зразки імплантів з Ti–6Al–4V за дослідними технологічними режимами: постійна потужність лазера – 195 Вт, швидкість сканування променя лазера – 1000...1200 мм/с з кроком 50 мм/с, відстань між проходами променя – 0,09...0,12 мм з кроком 0,01 мм при постійній швидкості сканування. Встановлені режими – потужність лазера 195 Вт, швидкість сканування 1000 мм/с та відстань між треками 0,12 мм забезпечують щільність металу зразків більше 99,99 %. На імплантах, виготовлених за рекомендованими режимами, дослідили вплив сили струму (0,5...2,5 А), напруги (12...20 В) та тривалості (3...6 хв) на втрату маси при електрохімічному поліруванні. З застосуванням візуального аналізу встановлено раціональні режими постобробки. Встановлено раціональні режими (сила струму 2 А, напруга 17 В) електрохімічного полірування дентальних імплантів для зниження шорсткості та при забезпеченні точності геометрії в області різьби. Встановлено залежність втрати ваги дентальних імплантів при електрохімічному поліруванні залежно від тривалості обробки. Бібліогр. 18, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення, титановий сплав, дентальний імплант, розробка обладнання

Значного поширення в останні роки отримала технологія Selective Laser Melting (SLM) – селективного лазерного плавлення – за рахунок можливості виготовлення складнопрофільних виробів високої щільності за комп'ютерною моделлю практично з будь-яких металевих порошків (цинк, бронза, сталь, титан і титанові сплави, алюміній і алюмінієві сплави, дорогоцінні метали та ін.)

За допомогою селективного лазерного плавлення можна створити унікальні складнопрофільні вироби без використання великої кількості дорогої оснастки і практично без відходів матеріалу. На сьогоднішній день технологія селективного лазерного плавлення знайшла застосування в різних галузях, в тому числі й в стоматологічній.

Традиційне виготовлення зубних протезів, коронок, мостів, яке виконується по зліпкам зубів, відходить в минуле. Воно займає багато часу, пов'язане з неприємними відчуттями і дискомфортом при знятті зліпків традиційним шляхом. Робота зубних техніків вельми трудомістка і займає багато часу, щоб отримати хороший результат. Унікальну форму кожного зуба відповідно до індивідуальних потреб пацієнта дуже важко відтворити за допомогою ручного виготовлення або

фрезерного верстата. Крім того, в технології фрезерування в ході обробки монолітного блоку матеріалу до 90 % йде в стружку.

Сучасні клініки поступово переходять на 3D-технології, які стають незамінними в стоматології і протезуванні. Для отримання моделі імпланту в цифровому варіанті потрібно провести лише 3D-сканування зубної порожнини пацієнта. А створення самого виробу при адитивному виробництві відбувається шар за шаром, шляхом додавання порції матеріалу відповідно до заданої моделі. Використовувані матеріали являють собою не монолітний блок як при фрезеруванні, а металевий порошок. При цьому 98 % невикористаного в побудові порошку використовується вдруге при виготовленні нових партій виробів. Тобто фактично це безвідходне виробництво. Використання сучасних технологій дозволяє збільшити обсяги виробництва без збільшення кількості персоналу.

Але найголовніше, що крім економії часу і витрат сучасні 3D-принтери гарантують високу точність і якість готових виробів. Металеві адитивні технології виробництва, такі як SLM і DMLS, особливо ефективні при створенні унікальних металевих деталей, які не виробляються серійно, але які

С.В. Аджамський – <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>, Г.А. Кононенко – <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>,

Р.В. Подольський – <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

© С.В. Аджамський, Г.А. Кононенко, Р.В. Подольський, 2021

повністю функціональні і отримані в короткі терміни. Для друку в стоматології застосовують в основному технологію селективного лазерного плавлення (SLM), яка забезпечує найменшу пористість металу виробів шляхом послідовного сплаву шарів металевих порошків за допомогою лазера. При заповненні робочої камери інертним газом створюється безкисневе середовище (безокисне), що дозволяє використовувати всі види матеріалів, включаючи кобальт-хромові сплави, титан і багато інших.

У компанії ТОВ «ALT Україна» є досвід створення 3D-принтерів, що дозволяють створювати деталі за SLM-технологією, які використовуються в таких високовідповідальних галузях як авіа- та ракетобудування, прецизійне машинобудування [1–3].

Виробництво імплантів з титанових сплавів медичного призначення з застосуванням адитивних технологій має наступні переваги: забезпечення оптимальної пористості поверхні у вигляді губчастої структури з рекомендованими параметрами для інтенсивного остеосинтезу і остеointegraції; формування перехідних поверхонь з заданою геометрією і шорсткістю, тим самим створюючи всі умови, що перешкоджають проникненню інфекції в зоні контакту з м'якими тканинами і шкірою пацієнта; формування всередині імпланту каналів складної форми для внутрішньої доставки лікарських препаратів, а також тонкостінних елементів; формування різьби з будь-яким профілем, в тому числі зі змінним діаметром і кроком; створення приєднувальних поверхней для швидкозмінних абатментів [4].

Таким чином, розробка обладнання та його вітчизняне виробництво, відпрацювання режимів SLM-технології для виготовлення високоякісних металовиробів стоматологічного призначення є актуальним завданням.

Стан розроблення питання. Сплав Ti–6Al–4V (відомі аналоги – BT6, Grade 5) широко використовується в області адитивних технологій для виготовлення імплантів. Цей сплав є інертним по відношенню до біологічного середовища [5, 6]. Титанова матриця деталі вступає в комплексну взаємодію з тканинами, включаючи механічну, електрохімічну, теплову, гідродинамічну [7, 8].

Даний сплав має низькі значення модуля пружності (табл. 1), що дає можливість отримання пористих, губчастих, сітчастих структур матеріалів, наближених до властивостей кісткової тканини людини [9].

Деталі, виготовлені способом адитивного виробництва, можуть мати інші механічні властивості в порівнянні з деталлю, виготовленою традиційним способом виробництва. Різна поведінка

може бути пояснена відмінностями в мікроструктурі [11].

Одним із поширених способів постобробки деталей, виготовлених за SLM-технологією, є електрохімічне полірування [12, 13]. За допомогою процесу електрохімічного полірування досягається точність деталі, в даному випадку різьби для розміщення імпланту в щелепівій кістці.

Для виготовлення стоматологічних виробів використовуються малі 3D-принтери, які мають розміри платформи для побудови менше ніж 150×150×150 мм. Зазвичай невеликі машини мають відносно невелику потужність лазера <200 Вт і швидкість нарощування. Однак машини цієї категорії мають відносно малу площу променя в фокусі (35...50 мкм), і завдяки цьому, мають кращу роздільну здатність, менші відхилення від розмірів, більш високу якість поверхні та деталізацію деталей. У роботах [14, 15] наведено перелік дослідницьких та наукових машин та моделей для реалізації технології селективного лазерного плавлення.

Метою роботи було розробка та виготовлення обладнання, відпрацювання режимів друку за технологією SLM та електрохімічного полірування дентальних імплантів з Ti–6Al–4V.

Матеріал і методика досліджень. Для матеріалів медичного призначення надважливим питанням є співвідношення біосумісності, стійкості до корозії і міцності. Для виготовлення дентальних імплантів в роботі використовували титановий сплав Ti–6Al–4V хімічного складу, мас. %: 6,21 Al; 4,03 V; 0,04 Fe; 0,1 C; 0,7 O; 0,02 N; Ti – база. Вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа PEM-106 (рис. 1, а) для визначення форми і розмірів частинок. На рис. 1, б наведено результати аналізу.

Дослідження мікроструктури проводилися на оптичних мікроскопах Olympus Tokyo та CarlZeiss AxioVert 200M mat. Дослідження щільності зразків проводилось мікроструктурним методом за допомогою програмного забезпечення Atlas та його стандартного модулю Threshold з визначенням відсотку площі, яку займають дефекти.

Застосування сучасних технологій адитивного виробництва дозволяє не тільки виготовляти імпланти максимально наближені до індивідуальних параметрів пацієнта (рис. 2, а), одночасно виготовляти велику кількість імплантів з різною геометрією (рис. 2, б), досягати високі значення механічних властивостей завдяки унікальній структурі, яка формується при високих швидкостях охолодження у малих ваннах розплаву, але й

Таблиця 1. Механічні властивості титанового сплаву і кістки [10]

Матеріал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	δ , %	Ψ , %
Ti–6Al–4V	795	860	400	11,5	10	25
Кістка	250	-	200	2,5	0,5	-

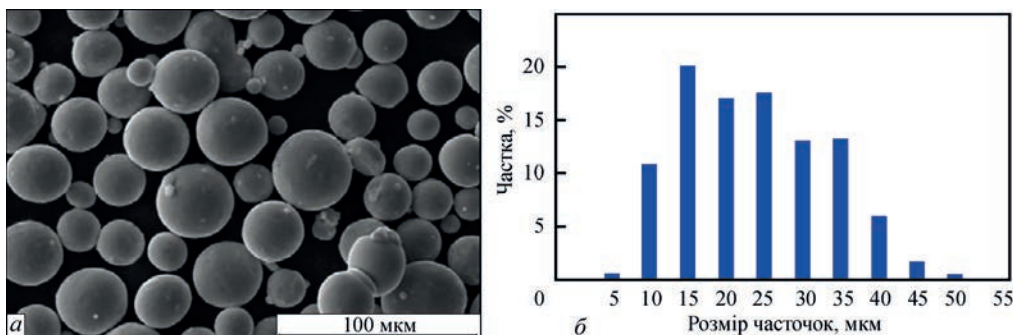


Рис. 1. Частинки вихідного матеріалу Ti-6Al-4V ($\times 500$) (а) та результати гранулометричного аналізу (б)

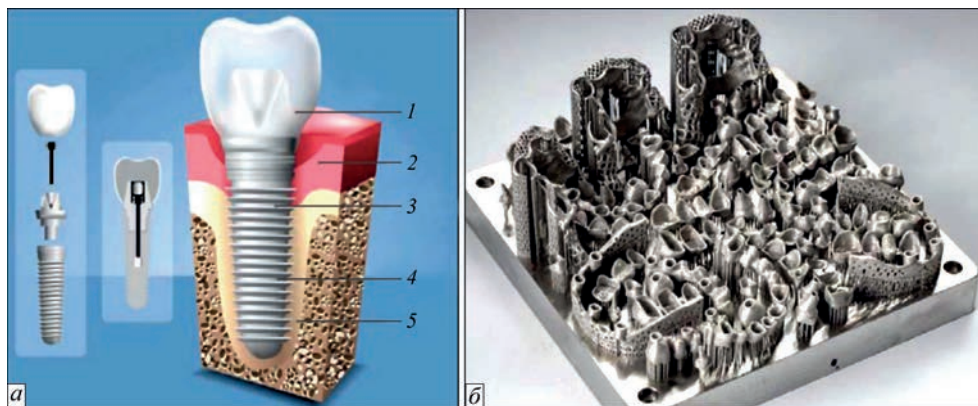


Рис. 2. Схематичне зображення дентального імпланту (а): 1 – коронка; 2 – десна; 3 – зубний імплант; 4 – корінь зуба; 5 – щелепна кістка [16], одночасно виготовлені імпланти на платформі (б)

покращувати остеointegraцію завдяки розвиненій поверхні між верхівками різьби.

Друк зразків проводився на 3D-принтері Alfa-150D виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна». Електрохімполірування проводилось у розчині плавикової кислоти (HF), азотної кислоти (HNO_3) з гліцерином ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$). Контроль ваги проводився за допомогою аналітичних ваг АДВ-2000.

Результати досліджень. Розроблено та виготовлено надкомпактний 3D-принтер (габаритні розміри: $730 \times 700 \times 1818$ мм; вага 450 кг) оновленої моделі Alfa-150D з розміром камери робочого поля $150 \times 150 \times 180$ мм (рис. 3). Це дозволяє його розмішувати навіть у малогабаритному приміщенні. Принтер оснащений одиночною оптичною системою, застосовано високоточний волоконний (ітербієвий) лазер з безперервним випромінюванням та повітряним охолодженням з номінальною оптичною потужністю 200 Вт та діаметром фокусної плями 45 мкм. Товщина шару складає від 20 до 100 мкм, точність позиціонування лазерного променя 0,15 мкм, витрата інертного газу (аргон) під час друку – до 3 л/хв.

Також як переваги 3D-принтера Alfa-150D можна відзначити:

- камера побудови з можливістю підготовки процесу друку та розпакування готових виробів без використання додаткових засобів індивідуального захисту;
- система регенерації фільтрів, яка дозволяє провести процедуру самоочищення фільтруючих

елементів, значно знижує витрати та необхідність заміни газових фільтрів;

- підтримка інертного середовища і мінімальний вміст кисню в камері побудови, ізоляція порошку в подавальному бункері від зовнішнього середовища для запобігання окисленню є особливо важливими для виготовлення виробів медичного призначення;

- вбудована промислова відеокамера для здійснення безперервного моніторингу процесу побудови й архівації даних з високою роздільною здатністю знімків.

Були виготовлені зразки імплантів за технологією SLM з порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V за дослідними технологічними режимами: постійна потужність лазера 195 Вт, швидкість сканування променю лазера змінювалась від 1000 до 1200 мм/с з кроком 50 мм/с, відстань між проходами променю змінювалась від 0,09 до 0,12 мм з кроком 0,01 мм при постійній швидкості сканування (табл. 2), використовували захисний газ – аргон.

Дослідження мікроструктури основного тіла

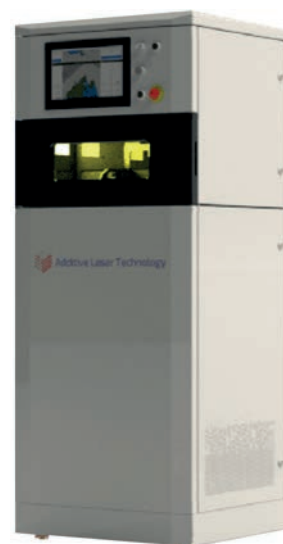


Рис. 3. Загальний вигляд 3D-принтера Alfa-150 D

Таблиця 2. Дослідні режими SLM технології при друку з порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V та щільність металу зразків

Номер зразка	Швидкість сканування, мм/с	Інтервал між проходами променю, мм	Щільність металу, %
1	1000	0,09	99,85
2		0,10	99,92
3		0,11	99,95
4		0,12	99,99
5	1050	0,09	99,88
6		0,10	99,93
7		0,11	99,98
8		0,12	99,95
9	1100	0,09	99,91
10		0,10	99,95
11		0,11	99,99
12		0,12	99,93
13	1150	0,09	99,92
14		0,10	99,98
15		0,11	99,95
16		0,12	99,88
17	1200	0,09	99,94
18		0,10	99,99
19		0,11	99,3
20		0,12	99,82

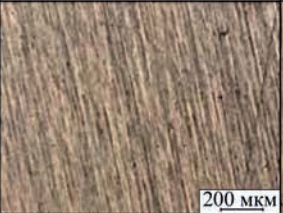
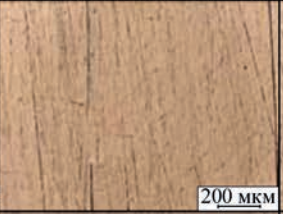
зразків показали, що їх середня щільність складає 99,9 % (табл. 2, 3).

Були обрані раціональні режими, які дозволяють виготовляти деталі зі сплаву Ti-6Al-4V за SLM-технологією з високою щільністю металу, за якими були виготовлені імпланти з розвинутою поверхнею між верхівками різьби згідно моделі, наданої замовником.

Важливим етапом виготовлення дентальних імплантів є постобробка їх поверхні. Зазвичай застосовують піскоструминну обробку та електрохімічне травлення або полірування. При дослідженні імплантів світових виробників [17, 18] встановлено, що застосування піскоструминної обробки призводить до наявності залишків оксиду кремнію на поверхні імпланту, що може негативно вплинути на остеоінтеграцію і утворення кісткової тканини.

В роботі було проведено відпрацювання режимів електрохімполірування виробів зі сплаву Ti-6Al-4V. Дослідні режими представлені на ідеальній вольт-амперній кривій (рис. 4) та в табл. 4.

Таблиця 3. Мікроструктура (×100) сплаву Ti-6Al-4V при виготовленні за SLM-технологією з застосуванням дослідних режимів

Швидкість сканування, мм	Інтервал між проходами променю лазера, мм			
	0,09	0,10	0,11	0,12
1000				
1050				
1100				
1150				
1200				

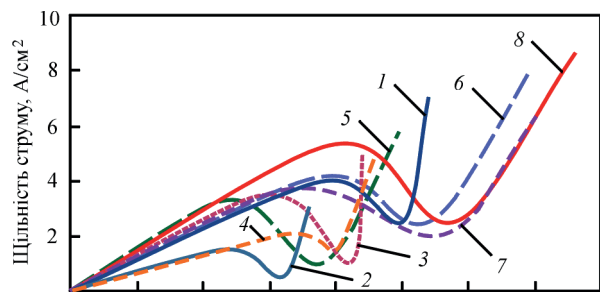


Рис. 4. Вольт-амперні криві дослідних зразків: 1 – 4; 2 – 2-2; 3 – 4-2; 4 – 5-2; 6 – 3-2; 7 – 6-1; 8 – 4-1

Таблиця 4. Режими електрохімічного полірування зразків

Маркування зразків	Сила струму, А	Напруга, В
4	2,5	19
4-2	1,0	15
3-1	1,0	12
6-1	2,0	17
2-2	0,5	12
5-2	1,5	17
3-2	2,0	19
4-1	2,5	20

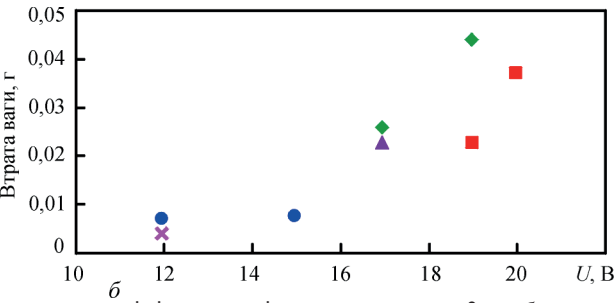
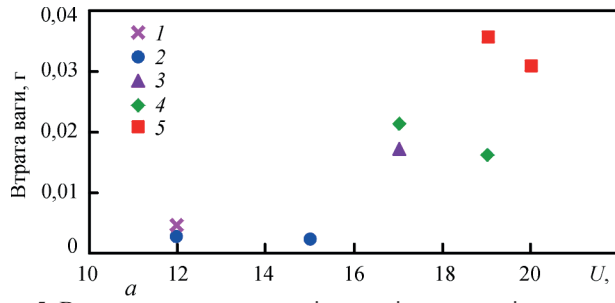


Рис. 5. Втрата ваги дентальних імплантів при дослідних режимах електрохімічного полірування: а – через 3 хв; б – через 6: 1 – сила струму 0,5 А; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0; 5 – 2,5

Виходячи з результатів аналізу вольт-амперної кривої встановлено, що зони з оптимальними умовами полірування були на зразках 6-1, 4-1 та 3-2. За даними режимами було отримано стабільну зону оптимальних умов електрохімічного полірування, дана зона утворилась в діапазоні напруги від 25 до 30 В, з діапазоном сили струму від 2,0 до 2,5 А. Зразки, що були піддані електрохімічному поліруванню при параметрах сили струму від 0,5 до 1,0 А мають невелику зону стабільності з швидким переходом до зони пазирькового кипіння, в результаті якого утворювалась точкова корозія матеріалу з наступним невеликим руйнуванням різби імпланту.

Особливістю SLM-технології є наявність порошку, який контактує з треками контуру виробу. В результаті часточки порошку вплаваються в граничні об'єми металу поблизу зовнішньої поверхні. В роботі було проведено контроль втрати ваги зразків з метою визначення раціональних режимів електрохімічного полірування для прибирання часточок без руйнування основної деталі (рис. 5–7).

На підставі отриманих даних втрати ваги від напруги при змінній силі струму були побудовані графіки, з яких видно, що найбільша інтенсивність втрати ваги після 3 хв електрохімічного полірування відбувається при силі струму 2,5 А та напрузі 20 В, а при 6 хв в діапазоні сили струму 2,0...2,5 А та напрузі 19...21 В (рис. 5).

Встановлено, що збільшення тривалості полірування з 3 до 6 хв призводить до деякого збільшення втрати ваги (рис. 6). При малій напрузі – 12 В – при збільшенні тривалості процесу відбувається незначна зміна маси імпланту, що свідчить про те, що процес полірування відбувається за нераціональним режимом, оксидна плівка на поверхні стає

перепоною для перебігу процесу полірування. Зі збільшенням напруги різниця втрати ваги після 3 і після 6 хв збільшується. Застосовувана сила струму відповідає режимам, наведеним у табл. 4.

Було проведено візуальний аналіз даних імплантів (рис. 7). Можна бачити, що при режимах: сила струму 1 А та напруга 12 В (зразок 3-1) після 3 хв полірування на поверхні залишилась значна кількість вплавлених часточок, відсутній металевий блиск, що свідчить про високу шорсткість. Після полірування протягом 6 хв шорсткість зменшилась, але все ще залишилась достатньо високою, при цьому утворилась оксидна плівка синього кольору.

При поліруванні за режимами 2 А та 17 В (наприклад, зразок 6-1) через 3 хв обробки імплант має помірний металевий блиск, поверхня різби не містить великої кількості вплавлених часточок, геометрія виробу має високу точність. При збільшенні тривалості полірування відбувається надмірне стравлювання різби поблизу верхівки імпланту. Оскільки ця ділянка має меншу площу поверхні, то поблизу неї найбільш інтенсивно проходять всі процеси.

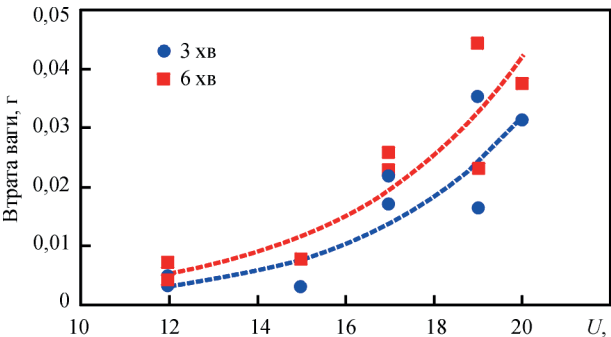


Рис. 6. Втрата ваги дентальних імплантів при електрохімічному поліруванні залежно від тривалості обробки

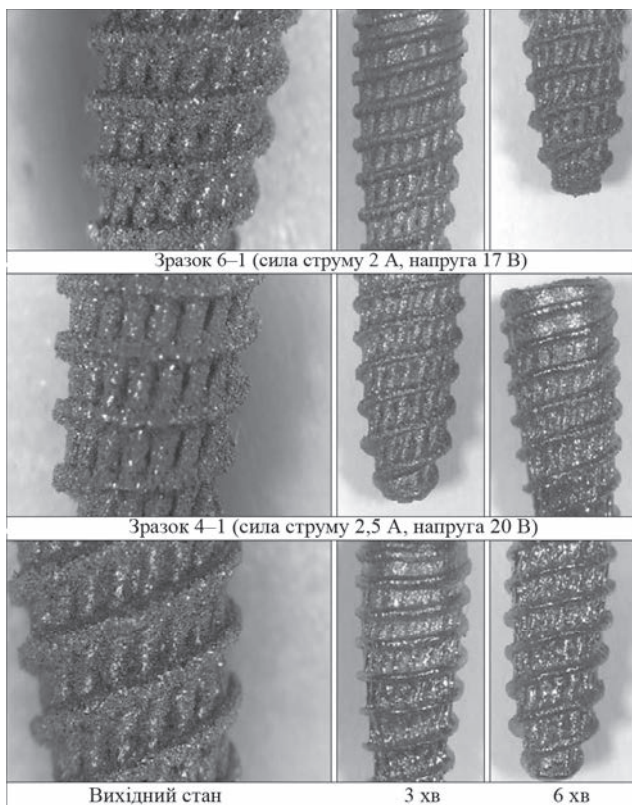


Рис. 7. Зміна вигляду зразків після електрохімічного полірування за дослідними режимами

Застосування режимів 2,5 А та 20 В (наприклад, зразок 4-1) вже після 3 хв полірування призводить до втрати геометрії різьби, а після 6 хв цей ефект підсилюється.

За результатами аналізу отриманих даних було встановлено раціональні режими електрохімічного полірування дентальних імплантів, при якому процес проходить стабільно та ефективно: сила струму 2 А, напруга 17 В, тривалість 3 хв.

Висновки

1. Розроблено та виготовлено сучасне прогресивне обладнання вітчизняним виробником для реалізації технології селективного лазерного плавлення для застосування у стоматологічній галузі: 3D-принтер Alfa-150D виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна».

2. Експериментально визначено технологічні режими виготовлення дентальних імплантів зі сплаву Ti-6Al-4V за технологією селективного лазерного плавлення, що дозволяють досягти щільності 99,99 %: потужність лазера 195 Вт, швидкість сканування 1000 мм/с, відстань між треками 0,12 мм.

3. На основі побудованих реальних вольт-амперних кривих та експериментальних досліджень встановлено раціональний режим (сила струму 2 А, напруга 17 В) електрохімічного полірування дентальних імплантів для зниження шорсткості при забезпеченні точності геометрії в області різьби.

4. Встановлено залежність втрати ваги дентальних імплантів при електрохімічному поліруванні

залежно від режимів обробки. Показано, що закономірність втрати ваги зі збільшенням напруги має нелінійний характер. Для різного часу витримки в електроліті дослідних зразків ця закономірність має близький характер, при цьому збільшення тривалості призводить до більшої втрати ваги.

Список літератури

1. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. (2020) Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на пористість металовиробів. *Автоматичне зварювання*, **10**, 14–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.10.03>
2. Аджамський С.В., Кононенко А.А., Подольський Р.В. (2020) Перспективы применения аддитивных технологий в авиа- и ракетостроении. *Авиационно-космическая техника и технология*, **7**(167), 59–65. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2020.7.09>
3. S.V. Adzhamsky, H.A. Kononenko, R.V. Podolskyi (2021) Analysis of Structure After Heat Treatment of Inconel 718 Heat-Resistant Alloys Made by SLM-Technology, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, **7**, 909–924 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.07.0909>
4. (2021) *Additive Laser Technology: Медицина* [Електронний ресурс]. Additive Laser Technology. <https://alt-print.com/uk/medicine>
5. Лукьянченко В.В., Малясова М.Г. (2010) Металлы в имплантологии. *Ортопедия, травматология и протезирование*, **3**, 130–132.
6. Розенберг О.А., Шейкин С.Е., Сохань С.В. (2010) Перспективы применения технически чистого титана для имплантов костной хирургии. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*, **2**, 50–54.
7. Долгалева А.А., Святослав Д.С., Путь В.А. и др. (2019) Морфологическая оценка остеоинтеграции при замещении дефекта нижней челюсти имплантатами, изготовленными с применением аддитивных технологий. Экспериментальное исследование. *Медицинский алфавит. Серия «Стоматология»*, **Т. 1**, **5**(380), 63–68.
8. Василук В. П., Штраубе Г. И., Четвертных В. А. (2013) Использование аддитивных технологий при восстановлении дефектов лицевого скелета. *Пермский медицинский журнал*, **Т. 30**, **3**, 60–65.
9. Храпов Д., Сурменева М.А. (2019) Исследование механических свойств композита на основе сетчатого скэффолда, полученного из сплава Ti-6Al-4V методом аддитивных технологий, и поликапролактона. *Перспективы развития фундаментальных наук: сб. науч. тр. XVI Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 23–26 апреля 2019 г. в 7 т.* Томск, Изд-во ТПУ. Т. 1: Физика, сс. 346–248.
10. Тополюський В.Ф., Ахонин С.В., Григоренко Г.М., Петриченко І.К. (2012) Разработка новых титановых биосовместимых сплавов для медицинского применения. *Современная электрометаллургия*, **1**, 106, 22–25.
11. Kahlin, M. (2017) Fatigue performance of additive manufactured ti6al4v in aerospace applications //15: *Licentiate Thesis*, 1775, P.71.
12. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Бадюк С.І. (2021) Дослідження ефективності електрохімічного полірування зразків змінного перерізу з різною шорсткістю зі сталі AISI 316L, виготовлених за технологією SLM. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, **2**, 170, 66–73. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2021.2.08>
13. Łyczkowska-Widłak, E., Lochyński, P., Nawrat, G. (2020) Electrochemical Polishing of Austenitic Stainless Steels. *Materials*, **13**, **11**, article id: 2557, 25 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13112557>
14. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. (2021) Досвід застосування регулювання діаметра фокусної плями променя лазера для підвищення продуктивності СЛП-процесу. *Автоматичне зварювання*, **5**, 21–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.01>
15. Khorasani, A., Gibson, I., Kozhuthala, J. Veetil, Ghasemi, A.H. (2020) A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers. *Int. J. Adv. anuf Technol.*, **108**, 191–209.

16. (2019) Periodontal Associate LLC. *Same-Day Dental Implants* [Електронний ресурс]. Periodontal Associate LLC. Periodontal Associate. <https://www.periodontalassociatesnj.com/dentistry/dental-implants/same-day-dental-implants>.
17. Гурін П.А., Скорик Н.А. (2018) Сравнительный морфологический и химический анализ поверхности винтовых дентальных имплантатов систем AnyOne (Южная Корея), Biohorizons (США) и UNO (Израиль), Radix-Oston (Беларусь) и Radix-Balance (Беларусь). *Зб. наук. праць співробітників НМАПО імені П.Л. Шупика*. Нац. мед. акад. післядиплом. освіти ім. П.Л. Шупика МОЗ України; Вороненко Ю.В. (ред.). Київ, сс. 133–156.
18. Edwards, P., Ramulu, M. (2014) Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A* 598, 327–337.
19. Khrapov, D., Surmeneva, M.A. (2019) Study of mechanical properties of composite based on mash scaffold made of Ti–6Al–4V alloy using the method of additive technologies and polycaprolactone. In: *Proc. of 16th Int. Conf. of Students, Graduate Students and Young Scientists on Prospects of Fundamental Sciences Development (Tomsk, 23-26 April, 2019)*. Tomsk, TPU, Vol.1: Physics, 346–248.
20. Topolsky, V.F., Akhonin, S.V., Grigorenko, G.M., Petrichenko, I.K. (2012) Development of new titanium bio-compatible alloys for medical application. *Sovrem. Elektrometall.*, 1, 106, 22–25 [in Russian].
21. Kahlin, M. (2017) *Fatigue performance of additive manufactured Ti6Al4V in aerospace applications. 15: Licentiate Thesis*, 1775, 71.
22. Adjamskiy, S.V., Kononenko, G.A., Podolskiy, R.V., Badyuk, S.I. (2021) Examination of efficiency of electrochemical polishing of variable cross-section samples with different rigidity from AISI 316L steel made using SLM technology. *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, 2(170), 66–73 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2021.2.08>
23. Lyczkowska-Widlak, E., Lochyński, P., Nawrat, G. (2020) Electrochemical polishing of austenitic stainless steels. *Materials*, 13(11), article id: 2557, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13112557>
24. Adjamskiy, S.V., Kononenko, G.A., Podolskiy, R.V. (2021) Improving the efficiency of the SLM-process by adjusting the focal spot diameter of the laser beam. *The Paton Welding J.*, 5, 18–23. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.01>
25. Khorasani, A., Gibson, I., Kozhuthala, J., Veetil, Ghasemi, A.H. (2020) A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 108, 191–209.
26. (2019) Periodontal Associate LLC. *Same-Day Dental Implants*. Periodontal Associate LLC. Periodontal Associate. <https://www.periodontalassociatesnj.com/dentistry/dental-implants/same-day-dental-implants>.
27. Gurin, P.A., Skorik, N.A. (2018) Comparative morphological and chemical analysis of surface of helical dental implants of AnyOne system (South Korea), Biohorizons (USA) and INO (Israel), Radix-Oston (Belarus) and Radix-Balance (Belarus). *Transact. of NMAPO, Ukraine*. Ed. by Yu.V. Voronenkov. Kyiv, 133–156 [in Ukrainian].
28. Edwards, P., Ramulu, M. (2014) Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti–6Al–4V. *Mater. Sci. and Engineering: A* 598, 327–337.

References

APPLICATION OF SLM-TECHNOLOGY FOR MANUFACTURE OF DENTAL IMPLANTS FROM Ti – 6Al – 4V ALLOY

S.V. Adjamskiy¹, G.A. Kononenko^{1,2}, R.V. Podolskiy^{1,2}

¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, Dnipro, Str. Rybinska, 144. E-mail: info@alt-print.com

²Institute of Ferrous Metallurgy. Z.I. Nekrasova National Academy of Sciences of Ukraine. 49000, Dnipro, Sq. Academician Starodubov, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Nowadays, SLM-technology has found application in various fields, including dental. The manufacture of dental implants by SLM has significant advantages. The aim of the work was the development and manufacture of equipment, practicing printing modes on SLM technology and electrochemical polishing of dental implants with Ti–6Al–4V. The titanium Ti – 6Al – 4V alloy of the chemical composition, wt. %: 6.21 Al; 4.03 V; 0.04 Fe; 0.1 C; 0.7 O; 0.02 N; Ti – base. The source material was examined using a scanning electron microscope REM-106 and microstructure was examined by CarlZeiss AxioVert 200M mat. The weight control was performed by the analytical scales ADV-2000. Electrochemical polishing was performed in a solution of hydrofluoric acid (HF), nitric acid (HNO₃) with glycerol (C₃H₈O₃). The ultra-compact 3D printer Alfa-150D with a working field size of 150 × 150 × 180 mm was designed and manufactured. The printer is equipped with a high-precision ytterbium laser with air cooling of 200 W power. The positioning accuracy of the laser beam is 0.15 μm. The thickness of the working layer is 20...100 μm. The samples of implants from Ti – 6Al – 4V were made according to experimental technological modes: constant laser power – 195 W, laser beam scanning speed – 1000...1200 mm/s with a step of 50 mm/s, distance between beam passages – 0.09...0.12 mm with a step of 0.01 mm at a constant scanning speed. The set modes: laser power is 195 W, scanning speed is 1000 mm/s and distance between tracks is 0.12 mm provide the density of metal samples of more than 99.99%. On the implants manufactured according to the recommended modes, the effect of current strength (0.5...2.5 A), voltage (12...20 V) and duration (3...6 min) on mass loss during electrochemical polishing was investigated. Rational modes of post-treatment were established with the use of visual analysis. Rational modes (current 2 A, voltage 17 V) of electrochemical polishing of dental implants for reduction of roughness and during maintenance of accuracy of geometry in the field of a carving are established. The dependence of weight loss of dental implants during electrochemical polishing depending on the duration of treatment was established. 18 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

Keywords: selective laser melting, titanium alloy, dental implant, equipment development

Надійшла до редакції 17.09.201

ПОРІВНЯННЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ ЗА МОНО- ТА БІФІЛЯРНОЮ СХЕМАМИ

Ю.М. Ланкін, В.Г. Соловійов, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова

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

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) дротяними електродами з біфілярною схемою підключення живлення в даний час не застосовується. Є усі підстави вважати, що така схема підключення має навіть більше переваг перед канонічною двоелектродною ЕШЗ. Тому потрібні додаткові спеціальні дослідження процесу біфілярної ЕШЗ. Наведено порівняння процесу електрошлакового зварювання при підключенні електричного живлення за канонічною двоелектродною схемою та біфілярною схемою зі зрівняльним дротом і подвоєнням вторинної напруги. Наведено результати порівняння обох схем ЕШЗ за енергетичними витратами; досліджено закономірності тепловиділення в шлаковій ванні при зміні її геометричних параметрів, координат місць і величини заглиблення електродів, величини прикладеної до електродів напруги та швидкості подання електрода. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, біфілярна схема, шлакова ванна, металева ванна, електропровідність

Автоматичне електрошлакове зварювання (ЕШЗ) виконується із застосуванням одного, двох, трьох і більше електродних дротів. У двоелектродних апаратах електродні дроти підключаються до джерела живлення паралельно за схемою електрод–зварюваний виріб. У 1960-х роках в ІЕЗ ім. Є.О. Патона був розроблений новий спосіб електрошлакового переплавлення (ЕШП) – так зване біфілярне електрошлакове переплавлення [1–6]. Суть способу полягає в тому, що в біфілярній печі два витратні електроди підключені послідовно до вторинної обмотки однофазного трансформатора. Проте, разом з перевагами (такими, як сприятливе розташування зон основного тепловиділення в шлаковій ванні, зменшення реактивного опору пічного навантаження) двоелектродна піч виявилася працездатною лише в певному діапазоні режимів переплавлення внаслідок неефективного саморегулювання. Тобто при збуреннях, що діють на процес, плавлення електродів ставало нестійким. Для усунення цього недоліку зі збереженням переваг біфілярної схеми вторинна обмотка живлячого трансформатора виконується з середньою точкою, підключеною зрівняльним дротом до зварюваного виробу.

Біфілярна ЕШЗ дротяними електродами в даний час не застосовується. Є усі підстави вважати, що вона має навіть більше переваг перед канонічною двоелектродною ЕШЗ, чим у разі ЕШП. Оскільки площа перерізу плавких електродів в ЕШЗ і ЕШП значно відрізняється, то істотно відрізняються і теплофізичні процеси, що обумовлюють їх плавлення. Тому потрібні додаткові спеціальні дослідження процесу біфілярної ЕШЗ. Такі Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>, Соловійов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>, Тюкалов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-3491-193X>, Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>
© Ю.М. Ланкін, В.Г. Соловійов, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова, 2021

дослідження було проведено шляхом математичного моделювання процесів двоелектродної ЕШЗ за канонічною і біфілярною схемою підключення зварювального апарату до джерела живлення змінного струму. Для порівняння з канонічною двоелектродною ЕШЗ за схемою рис. 1, а було вибрано схему біфілярної ЕШЗ із зрівняльним дротом, що сполучає середню точку вторинної обмотки зварювального трансформатора із зварюваним виробом (рис. 1, б).

Метою цієї роботи є порівняння роздільного впливу різних чинників на теплові процеси ЕШЗ при підключенні живлення за канонічною двоелектродною схемою та біфілярною схемою зі зрівняльним дротом і подвоєнням вторинної напруги джерела живлення за допомогою математичного експерименту.

На рис. 1 наведено варіанти схем живлення ЕШЗ.

Для фізичних експериментів використовувався апарат АД-381Ш [7], розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. За основу моделювання взято експериментальні дані ЕШЗ, які було отримано в лабораторних умовах в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України за канонічною схемою живлення.

Технологічні параметри експериментальної ЕШЗ: товщина виробу $S = 80$ мм; відстань між першим електродом і найближчим водоохолоджувальним повзуном $L_1 = 10$ мм (при симетричному розташуванні електродів один відносно іншого); глибина шлакової ванни $h_{\text{ш}} = 50$ мм; діаметр електродного дроту $d_e = 3$ мм; кількість електродів $n = 2$, виріб – сталь 09Г2С; електродний дріт – сталь Св.08Г2С; флюс АН-8; формувальні повзуни

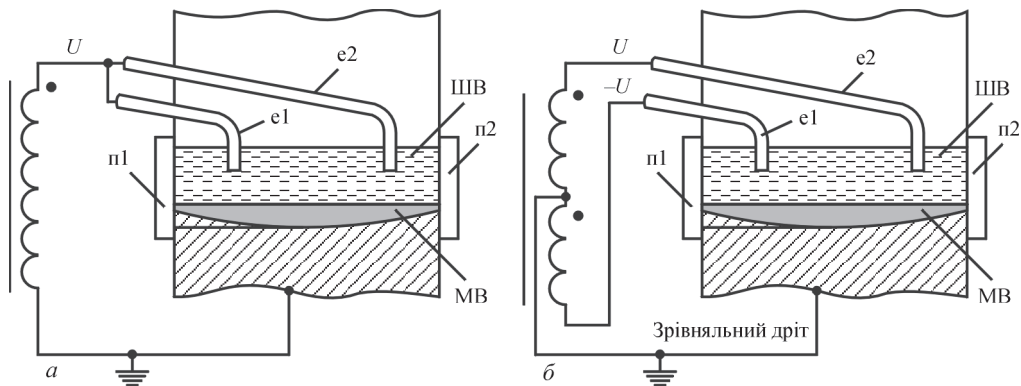


Рис. 1. Двоелектродні схеми живлення ЕШЗ: а – канонічна схема живлення; б – біфільарна схема живлення; U – напруга джерела живлення; e1 і e2 – плавкі електроди; p1 і p2 – повзуни, охолоджувані водою; ШВ і МВ – шлакова і металева ванни – мідь. Дані технологічного режиму ЕШЗ надано в табл. 1.

Результати експериментального двоелектродного ЕШЗ, проведеного з канонічною схемою живлення, використовувалися для валідації математичної моделі ЕШЗ. Математичне моделювання проводилося на графічній тривимірній моделі зони ділянки виробу (рис. 2, а), що включає кромки зварюваного метала на глибині 70 мм з обох сторін, на висоті ~140 мм, що наструюється (залежно від заданої глибини шлакової ванни, розрахункової глибини металевої ванни та висоти шва), і товщини виробу, що задається, ~80 мм.

Виходячи з положень теорії подібності [8], створена геометрична модель, що враховує подібність її геометричних параметрів з геометричними параметрами фізичної моделі. Основна умова для моделювання була такою, щоб забезпечити найкращу відповідність геометричної частини моделі з геометричними параметрами фізичного експерименту, при

використанні фізичних властивостей матеріалів шлаку, зварювального виробу і електродів [9] (табл. 2). Параметри $C_p[T]$, $\rho[T]$, $k[T]$, $\alpha[T]$, $\sigma_{st}[T]$, $\sigma_{sh}[T]$, задані відповідними апроксимуючими залежностями (в статті не наводяться) від температури T , К. Графічні параметри моделі, взяті за основу: $S = 80$ мм, $b = 30$ мм, $h_m = 50$ мм, $d_e = 3$ мм, $L1 = 10$ мм.

Нагрів шлакової ванни відбувається за рахунок резистивного тепла електричного струму, що виділяється при протіканні через неї. Для дослідження розподілу електричного поля, струму і потенціалу в шлаковій ванні, в зварюваному виробі, в шві, що утворюється, і повзунах, а також розподілу тепла в об'ємі досліджуваної зони використовувалася її скінченно-елементна модель (рис. 2) у складі шлакової і металевої ванни, двох повзунів, двох електродів, занурених в шлакову ванну, а також фрагментів виробу і зварювального шва.

Модель вирішує наступні рівняння:

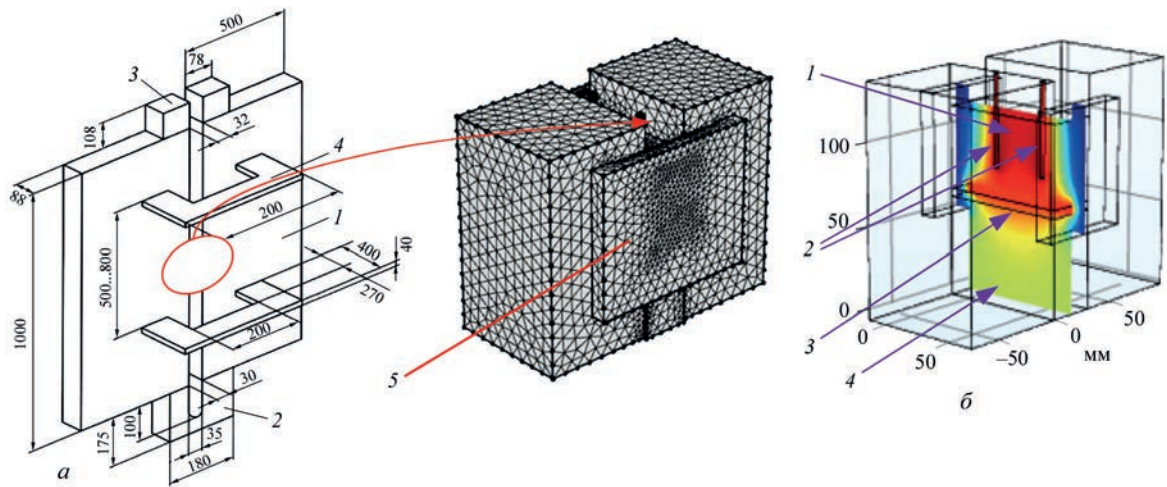


Рис. 2. Схема складання вертикального шва під ЕШЗ та скінченно-елементна модель фрагмента зони зварювання (а): 1 – виріб, 2 – карман вхідний, 3 – планка вивідна, 4 – скоба, 5 – повзун. Фрагмент графічної моделі в розрізі (б): 1 – шлакова ванна, 2 – електроди, 3 – металева ванна, 4 – зварний шов

Таблиця 1. Дані технологічного режиму ЕШЗ

Прохід	Спосіб зварювання	Зварювальний струм I , А	Напруга джерела живлення U , В	Рід струму	Швидкість зварювання v_z , (м/год)	Швидкість подачі електродного дроту $v_{\text{поз}}$, (м/год)
1	ЕШЗ	880...960	38...40	Змін.	1,0	190...210

Таблиця 2. Фізичні властивості матеріалів, що використовувалися в моделі

Параметр	Виріб	Електроди	Шлак	Повзуни	Шов
Теплоємність C_p , Дж/(кг·К)	$C_p[T]$	$C_p[T]$	1400	385	$C_p[T]$
Відносна діелектрична проникність ϵ	1	1	2,5	1	1
Щільність ρ , кг/м ³	$\rho[T]$	$\rho[T]$	2600	8960	$\rho[T]$
Теплопровідність k , Вт/(м·К)	$k[T]$	$k[T]$	295	400	$k[T]$
Коефіцієнт температурного розширення α , 1/К	$\alpha[T]$	$\alpha[T]$	-	17E-6	$\alpha[T]$
Питома електропровідність σ , См/м	$\sigma_{st}[T]$	$\sigma_{st}[T]$	$\sigma_{sh}[T]$	6E7	$\sigma_{st}[T]$

$$\rho(T)C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = Q,$$
 де $q = -k(T)\nabla T$; Q – додаткове джерело тепла (в якості додаткового джерела тепла може бути розігріта металева ванна).

При роботі з стаціонарними електричними струмами в середовищі, що є провідником, необхідно враховувати стаціонарне рівняння нерозривності. У стаціонарній системі координат точкова форма закону Ома свідчить:

$$J = \sigma(T)E,$$

де J – щільність струму; E – напруженість електричного поля.

Статична форма рівняння нерозривності вимагає:

$$\nabla J = -\nabla \sigma(T) \nabla U = 0,$$

де U – напруга.

В результаті валідації моделі за результатами експериментального ЕШЗ отримано наступні результати розрахунків при $U = 40$ В, $v_{\text{под}} = 200$ м/год:

- сумарний струм електродів $I = 922$ А;
- провідність ШВ $\sigma = 11,82$ См;
- швидкість зварювання 1,07 м/год.

Такий результат практично підтверджує правильність підібраних фізичних і графічних параметрів моделі і можливість використання її в запланованих математичних експериментах. У зв'язку з тим, що перемикання моделі з двохелектродної канонічної на біфілярну схему живлення не змінює ні фізичних, ні графічних параметрів самої моделі, а змінює тільки зовнішні ланцюги живлення, то вважаємо, що отримані параметри моделі поширюються і на модель ЕШЗ з біфілярною схемою живлення.

У моделі вирішується стаціонарне завдання, виводяться результати процесу, що встановився. Модель дозволяє визначати потенціал, щільність струму і температуру в кожній точці об'єму досліджуваної зони при різних варіаціях (в межах $\pm 20\%$) діаметру електродів, товщини виробу, величини проміжку, глибини шлакової ванни, а також величини заглиблення електродів (у межах $5 \dots 95\% h_{\text{ш}}$) і розташування електродів відносно повзунів (у межах $10 \dots 90\% S/2$).

За результатами математичного експерименту отримано залежність питомої провідності шлаку від температури для кожного елементарного об'єму ШВ. Проведено розрахунок величини заглиблення електродів l_z в ШВ (при $h_{\text{ш}} = 50$ мм), а також середньої температури поверхні металевої ванни $T_{\text{мв}}$ від U і $v_{\text{под}}$. Заглиблення електродів визначалося за результатами розрахунку температури нижнього торця електрода, яка досягла заданої температури плавлення електрода (1500°C).

На рис. 3, а наведено залежність провідності ШВ σ від U при незмінній $v_{\text{под}} = 280$ м/год і $L1 = 20$ мм. Провідність ШВ при біфілярній ЕШЗ і при рівності споживаної потужності з канонічною ЕШЗ завжди приблизно в 4 рази менша, ніж при канонічній. Залежність має екстремальний характер. Максимум σ спостерігається при $U = 50$ В для біфілярної ЕШЗ і при $U = 25$ В для канонічної ЕШЗ відповідно.

На рис. 3, б наведено залежність I від U . Струм при біфілярній схемі ЕШЗ завжди нижче в порівнянні із струмом при канонічній схемі у зв'язку з подвоєним значенням напруги для біфілярної схеми ЕШЗ. Цей чинник забезпечує зменшення енергетичних втрат в короткій мережі живлення. Оби-

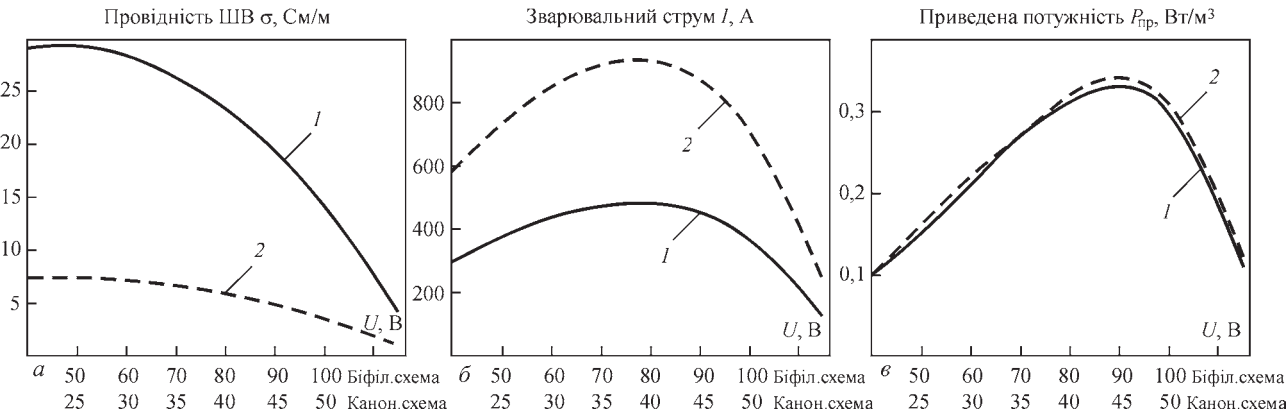


Рис.3. Залежність від напруги U : а – провідності ШВ σ ; б – зварювального струму I ; в – потужності $P_{\text{пр}}$, приведеної до одиниці об'єму шлакової ванни, для біфілярної і канонічної схем ЕШЗ при незмінній $v_{\text{под}} = 280$ м/год і $L1 = 20$ мм (1 – біфілярна схема ЕШЗ; 2 – канонічна)

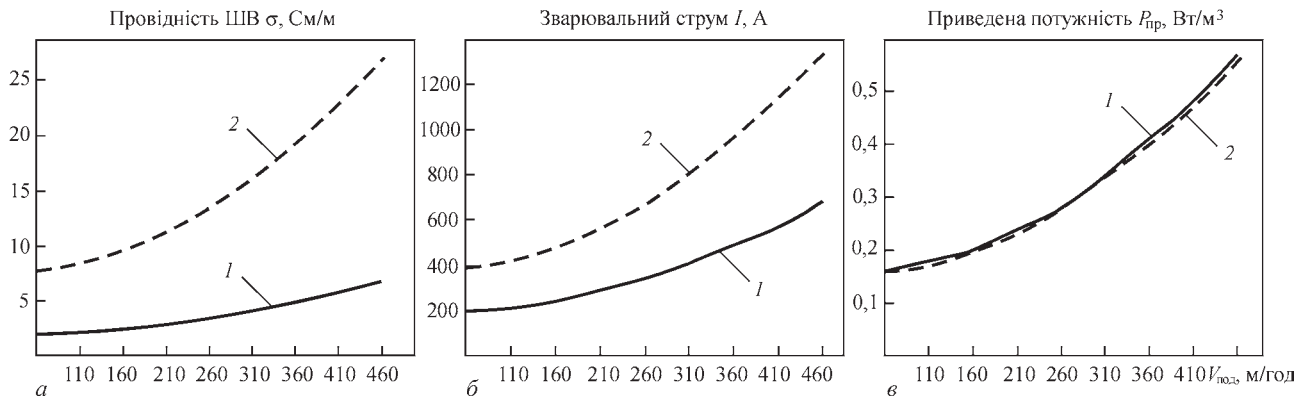


Рис. 4. Залежність від швидкості подання електродів $v_{\text{под}}$: а – провідності ШВ σ ; б – зварювального струму I ; в – потужності $P_{\text{пр}}$, приведені до одиниці об'єму шлакової ванни для біфілярної (1) та канонічної (2) схем ЕШЗ

дві залежності мають екстремальний характер з максимумом приблизно 480 А при 80 В при біфілярній схемі і приблизно 940 А при 40 В для канонічної схеми.

На рис. 3, в наведено залежність споживаної потужності ЕШЗ, приведені до одиниці об'єму ШВ, від напруги джерела U . Обидві залежності мають екстремальний характер. При одній і тій же продуктивності ЕШЗ для обох схем підключення джерела живлення споживана потужність процесу практично однакова.

Наявність екстремумів функцій $\sigma(U)$, $I(U)$ і $P_{\text{пр}}(U)$ необхідно використати з урахуванням оптимізації характеристик якості зварного з'єднання.

На рис. 4 представлено залежності провідності ШВ, струму джерела живлення та приведені споживаної потужності від $v_{\text{под}}$ при $U = 100$ В для біфілярної схеми та $U = 50$ В для канонічної схеми живлення ЕШЗ. Для усіх трьох залежностей спостерігається зростання їх значень при збільшенні швидкості подачі. Наведена споживана потужність процесу практично однакова.

При незмінній малій напрузі зварювання та швидкості подачі електродів, що підвищується, зазвичай спостерігається наближення торця електрода до металевої ванни, збільшення сили струму джерела живлення та споживаної потужності, приведені до об'єму ШВ. При зменшенні швидкості подачі повинен спостерігатися зворотний процес. При постійній швидкості подачі (напри-

клад, $v_{\text{под}} = 280$ м/год) і зменшенні напруги (наприклад, з 80 до 60 В для біфілярної схеми ЕШЗ або з 40 до 30 В для канонічної схеми) закономірність стає зворотною (рис. 3, б).

Так, для забезпечення заданої швидкості подачі при зменшенні напруги повинен збільшитися струм за рахунок заглиблення електрода в ШВ і зменшення опору проміжку між електродом і металевою ванною. Однак, при опусканні електродів ближче до металевої ванни, тобто до додаткового джерела тепла, швидкість їх плавлення збільшується, а вирівнювання швидкості подачі і лінійної швидкості плавлення відбувається без значного збільшення струму. Це пов'язано з суперпозицією тепла від резистивного нагріву та зовнішнього тепла від металевої ванни. Струм при цьому зменшується, потужність, що вводиться, зменшується, а швидкість плавлення тимчасово стабілізується. З часом у зв'язку зі зменшенням потужності (рис. 3, в), що вводиться, тепловий рівень в цій зоні падає, а заглиблення електродів збільшується. Подальше зниження температури ШВ може призвести до порушення стабільності ЕШЗ.

На рис. 5 наведено залежності провідності ШВ, струму джерела живлення та приведені споживаної потужності від зміни ширини проміжку виробу при незмінних значеннях $S = 80$ мм, $h_{\text{ш}} = 50$ мм, $v_{\text{под}} = 280$ м/год, $L1 = 20$ мм, $d_{\text{е}} = 3$ мм,

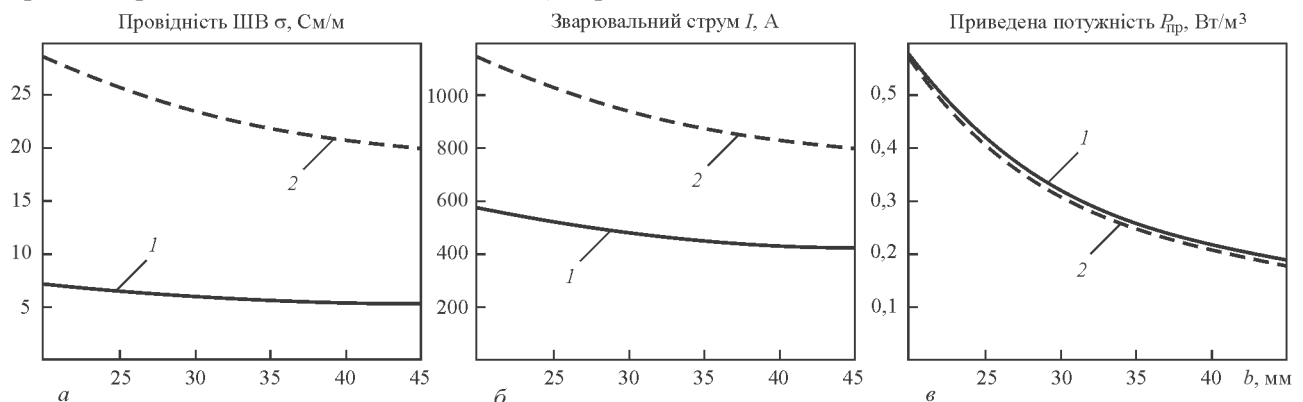


Рис. 5. Залежність від зварювального проміжку b : а – провідності ШВ, σ ; б – зварювального струму I ; в – потужності $P_{\text{пр}}$, приведені до одиниці об'єму шлакової ванни, для біфілярної (1) та канонічної (2) схем ЕШЗ

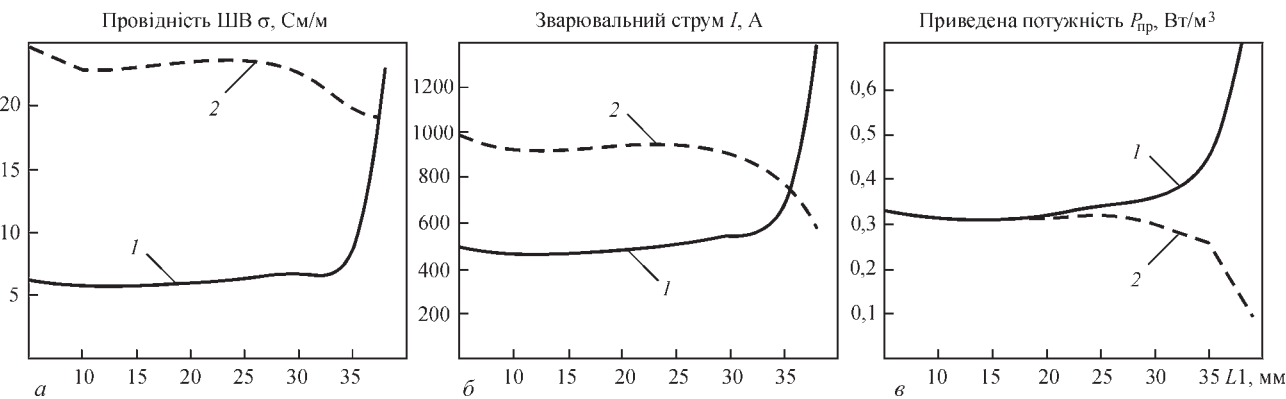


Рис. 6. Залежність від відстані між електродом і повзуном $L1$: а – провідності ШВ σ ; б – зварювального струму I ; в – потужності $P_{\text{пр}}$, приведеної до одиниці об’єму шлакової ванни, для біфілярної (1) та канонічної (2) схем ЕШЗ

$U = 80 \text{ В}$ для біфілярної схеми ЕШЗ і $U = 40 \text{ В}$ для канонічної схеми живлення ЕШЗ.

При збільшенні ширини проміжку від 20 до 45 мм спостерігається зменшення провідності ШВ (рис. 5, а), зменшення струму джерела живлення (рис. 5, б) і зменшення потужності (рис. 5, в), приведеної до одиниці об’єму ШВ для обох схем живлення ЕШЗ. Це пов’язано з видаленням електродів від виробу. Потужність (рис. 5, в), приведена до одиниці об’єму ШВ, практично не відрізняється для обох схем живлення за інших рівних і незмінних умов.

На рис. 6 наведено залежність провідності (рис. 6, а), струму джерела живлення (рис. 6, б) і приведеної потужності (рис. 6, в) від $L1$. Умови обчислювального експерименту ідентичні до умов для рис. 5. При збільшенні $L1$ з 5 до 15 мм спостерігається незначне зменшення провідності для обох схем підключення у зв’язку з видаленням електрода від повзунів, які мають безпосередній контакт з виробом. При збільшенні $L1$ з 15 до 25 мм спостерігається незначне збільшення провідності для обох схем підключення у зв’язку зі зближенням різнополярних електродів (біфілярна схема) і збільшенням шлакового електропровідного простору (канонічна схема). При збільшенні $L1$ з 25 до 38 мм спостерігається різке збільшення

провідності для біфілярної схеми за рахунок зменшення відстані між різнополярними електродними підключеннями. Останнє пов’язане з тим, що тепловий рівень ШВ між електродними збільшується за рахунок суперпозиції теплових полів кожного з електродів, при цьому збільшується радіальна складова швидкостей плавлення електродів, заглиблення електродів зменшується для вирівнювання швидкостей подання і плавлення електродів, а це, у свою чергу, призводить до зменшення струму. При біфілярній схемі живлення зближення електродів призводить до зменшення опору між ними. При цьому струм різко зростає, збільшуючи швидкість радіального плавлення, що призводить до зменшення заглиблення електродів. Такий режим може привести до виходу одного з електродів зі шлакового простору. Аналогічний характер мають зміни струмів (рис. 6, б) для обох схем підключення джерела. Приведені потужності (рис. 6, в) для обох схем практично не відрізняються при збільшенні $L1$ з 5 до 20 мм. Проте при збільшенні $L1$ з 20 до 38 мм приведена потужність при біфілярній схемі різко зростає, а при канонічній різко падає. Очевидно, не слід видаляти електроди від повзунів на відстань більше, ніж 20 мм, імовірно $L1 = L/4$.

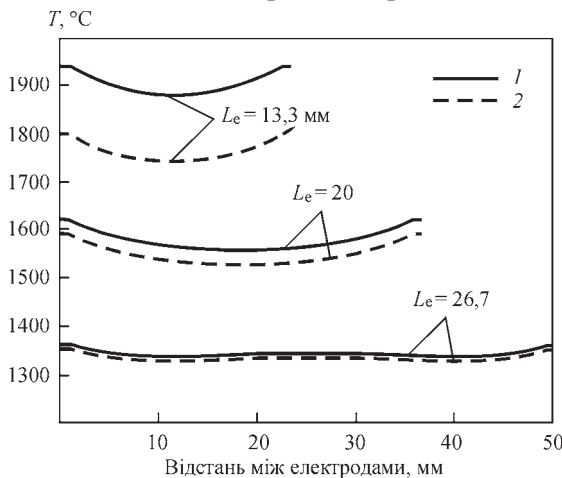


Рис. 7. Розподіл температури між серединами мокрих частин електродів для обох схем підключення живлення ЕШЗ: 1 – біфілярна; 2 – канонічна

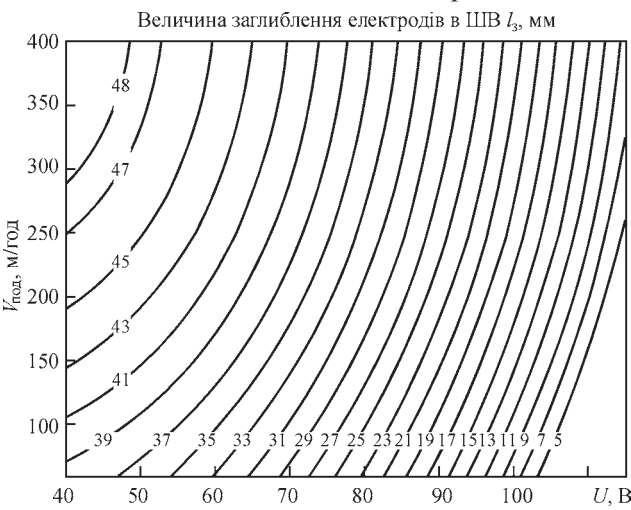


Рис. 8. Номограма розподілу величини заглиблення електродів в ШВ I_3 при різних поєднаннях значень U і $v_{\text{под}}$ для біфілярної схеми ЕШЗ

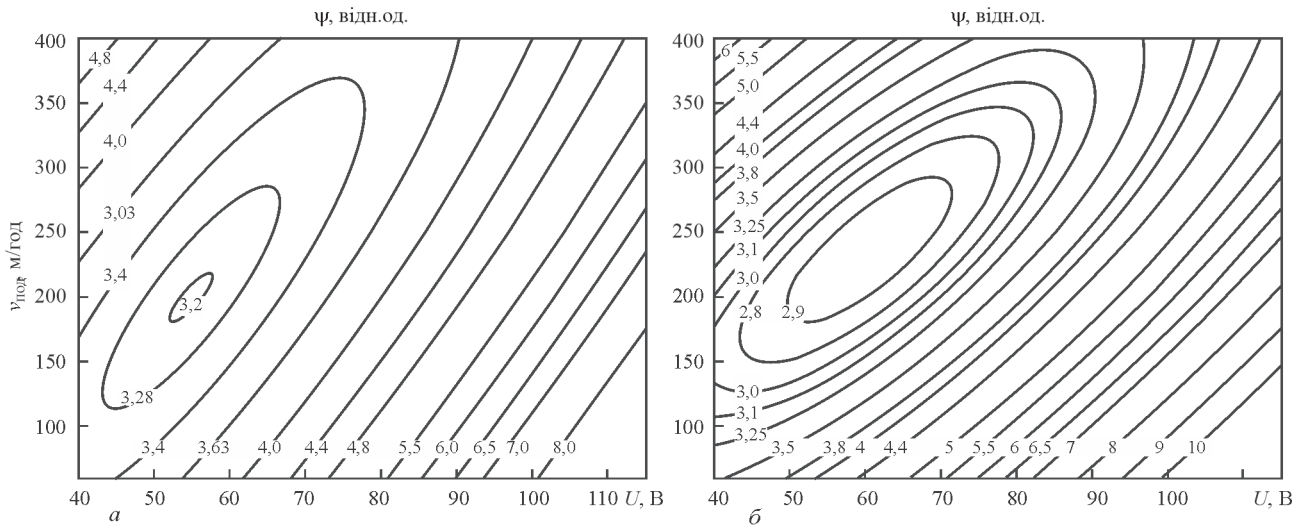


Рис. 9. Розподіл значень коефіцієнта форми зварювального шва ψ залежно від спільних значень U і $v_{\text{под}}$ для біфілярної (а) і канонічної (б) схем живлення ЕШЗ

На рис. 7 наведено залежності розподілу температури в ШВ між серединами мокрих частин обох електродів при різних значеннях відстані L_e між ними. Проведено порівняння цих розподілів для обох схем живлення. Із залежностей видно, що при відстані $L_e > 27$ мм тепловий рівень ШВ між електродами для обох схем підключення практично однаковий. Тобто перевага, яка пов'язана з управлінням проплавленням кромки виробу тільки напругою при біфілярній схемі відносно канонічної схеми живлення [1], при ЕШЗ підтверджується тільки при певних відстанях між електродами.

Одним з параметрів при моделюванні процесу ЕШЗ, який потрібний для управління процесом, вимір якого в реальному часі ускладнений, є величина заглиблення електродів. Тепло ШВ, яке є основним джерелом для плавлення при ЕШЗ, повинно бути найраціональніше використано як для плавлення електродів, оплавлення кромки виробу, необхідної взаємодії розплавленого присадного металу з розігрітим шлаком на шляху від електродів до металеві ванни, так і для підтримки необхідного теплового рівня та рівномірності нагріву металеві ванни. У зв'язку з цим при біфілярній схемі живлення особливе значення має підтримка величини заглиблення електродів на необхідному рівні, враховуючи, що основна концентрація тепла в ШВ зосереджена між електродами (за умови достатньої відстані між ними). На рис. 8 наведено номограму розподілу величини заглиблення електродів l_3 залежно від U і $v_{\text{под}}$, побудовану за результатами математичного експерименту на моделі та розрахунку температури нижнього торця електрода до досягнення заданої температури його плавлення.

Тепловий рівень металеві ванни підтримується за рахунок тепло-масообміну між розплавленим присадним металом і шлаковою ванною. За рахунок конвекції більш гарячі конгломерати шлаку підіймаються вгору, витісняючи вниз холодніші. В результа-

ті дії гравітаційних сил важчі з більшою щільністю конгломерати шлаку осідають вниз. Оскільки конгломерати шлаку рухаються в магнітному полі електричного струму, який протікає по електродах і по ШВ за допомогою заряджених частинок іонів в певному напрямі, а також крапель розплавленого металу, що рухаються вниз під дією гравітаційних сил, то на них діє електродинамічна сила Ампера.

При канонічній схемі живлення, якщо використовуються джерела постійного струму, краплі розплавленого металу, що падають, під дією сили Ампера падатимуть ближче до середини металеві ванни або змішуватимуться в сторони від середини металеві ванни залежно від полярності підключення установки. При біфілярній схемі живлення, якщо використовуються джерела постійного струму, краплі змішуватимуться від кожного електрода вліво або вправо залежно від полярності підключеного джерела живлення. При використанні джерела живлення зі змінним струмом краплі опускатимуться вертикально вниз по електродах, незалежно від того, канонічна або біфілярна схема живлення використовується.

Враховуючи викладене вище, величина заглиблення електродів при біфілярній схемі живлення має бути дещо збільшена для забезпечення теплового балансу між верхом і низом ШВ.

На рис. 9 наведено номограму розподілу коефіцієнта форми зварювального шва ψ залежно від U і $v_{\text{под}}$. Математичний експеримент проводився при $S = 80$ мм, $b = 30$ мм, $h_{\text{ш}} = 50$ мм, $L1 = 20$ мм, $d_e = 3$ мм.

Найкращі значення коефіцієнта форми зварювального шва виходять при малих швидкостях подання електродів і великій напрузі джерела живлення. Так, наприклад, при $v_{\text{под}} = 300$ м/год і $U = 115$ В для біфілярної схеми живлення $\psi = 6$ і $\psi = 5,7$ для канонічної схеми. Тобто зона режимів з високим значенням коефіцієнта ψ для біфілярної схеми набагато ширша, що дозволяє надійніше утримувати режим з великим коефіцієнтом форми

зварювального шва і направляти теплові потоки у бік поліпшення можливості формування поверхні зварного шва і проплавлення кромок виробів, що зварюються.

Висновки

1. Проведено пошук теплофізичних параметрів шлакової ванни як додаткових складових моделі ЕШЗ з урахуванням нерівномірного розподілу температури в шлаковій ванні, а також з урахуванням впливу температури охолоджуваних водою повзунів на розподіл температури виробу, шлакової та металевої ванни в приграничних зонах.

2. На моделях ЕШЗ з біфілярною та канонічною схемах живлення проведено попереднє порівняльне дослідження закономірності зміни провідності в шлаковій ванні при зміні геометричних параметрів шлакової ванни, а також координат місць і величини заглиблення електродів.

3. Перевага, яка пов'язана з управлінням проплавлення кромок виробу тільки напругою при біфілярній схемі відносно канонічної схеми живлення, підтверджується тільки при певних відстанях між електродами.

4. Досліджено закономірність зміни величини заглиблення електродів від величини напруги та швидкості подачі електродів. Показано, що при розташуванні торця електрода поблизу металевої ванни спостерігається зменшення заглиблення електрода і зменшення споживаної електричної потужності за рахунок суперпозиції тепла, виробленого струмом, що протікає в ШВ, і тепла МВ. Результуючого тепла досить для забезпечення необхідної швидкості плавлення електродів. Однак, у зв'язку зі зменшенням в зазначеному режимі тепла, створюваного електричною енергією, відбувається поступове зменшення теплового стану процесу ЕШЗ, що може призвести до його дестабілізації.

5. У загальному випадку зона режимів з високим значенням коефіцієнта форми зварювального шва для біфілярної схеми набагато ширше,

ніж для канонічної схеми, що дозволяє надійніше утримувати режим з достатньо великим коефіцієнтом форми зварювального шва і направляти теплові потоки у бік поліпшення можливості формування поверхні зварного шва і проплавлення кромок зварюваних виробів.

Список літератури/References

1. Медовар Б.И., Ступак Л.М., Бойко Г.А. и др. (1976) *Электрошлаковые печи*. Патон Б.Е. и Медовар Б.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
Medovar, B.I., Stupak, L.M., Bojko, G.A. et al. (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Jing, Xie (2008) Structure advantage of a 5-t double pole series circuit electroslag furnace. *Heavy Casting and Forging*, 5(3), 43–45. (In Chinese).
3. Xi-min, Zang, Tian-yu, Qiu, Xin, Deng et al. (2015) Industrial test of a 6-m long bearing steel ingot by electroslag remelting withdrawing process. *China Foundry*, 12(3), 202–207.
4. Tezuka, M., Yamamoto, S., Takahashi, F. et al. (2014) Internal quality of 2150 mm-diameter ingot manufactured using new 150-ton ESR furnace. *Proceedings of the 19th International Forgemasters Meeting (IFM). Tokyo (Japan)*, 29.09–03.10, pp. 90–94.
5. Son, I., Lee, W., Sim, Kw. et al. (2014) Installation of 150-ton new ESR facility and production of 120-ton ESR ingot for 12Cr HIP rotor forgings. *Ibid*, Tokyo (Japan), 29.09–03.10, pp. 333–337.
6. Kubin, M., Scheriau, A., Knabl, M. et al. (2013) Operational experience of large sized ESR plants and attainable quality of ESR ingots with diameter of up to 2600 mm. *Proceedings of the International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting (LMPC). Austin (Texas, USA)*, 22–25 September, pp. 57–64.
7. Ланкин Ю.Н., Москаленко А.А., Тюкалов В.Г. и др. (2008) Применение электрошлаковой сварки в строительстве и при ремонте металлургических агрегатов. *Сварщик*, 1, 6–9.
Lankin, Yu.N., Moskalenko, A.A., Tyukalov, V.G. et al. (2008) Application of electroslag welding in construction and in repair of metallurgical assemblies. *Svarshchik*, 1, 6–9 [in Russian].
8. Гухман А.А. (1973) *Введение в теорию подобия*. 2-е изд. Москва, Высш. шк.
Gukhman, A.A. (1973) *Introduction to similarity theory*. 2nd Ed. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
9. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др. (1989) *Марочник сталей и сплавов*. Сорокин В.Г. (ред.). Москва, Машиностроение.
Sorokin, V.G., Volosnikova, A.V., Vyatkin, S.S. et al. (1989) *Grades of steels and alloys*. Ed. by V.G. Sorokin. Moscow, Mashinostroyeniye [in Russian].

COMPARISON OF THE PROCESSES OF ELECTROSLAG WELDING AT POWER CONNECTION BY MONO- AND BIFILAR DIAGRAM

Yu.M. Lankin, V.G. Solovyov, V.G. Tyukalov, I.Yu. Romanova

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

E-mail: hhsova@gmail.com

Electroslag welding (ESW) with wire electrodes with a bifilar diagram of power connection is not applied now. There is every reason to believe that such a connection diagram has even more advantages over the canonic two-electrode ESW. Therefore, additional special investigations of the process of bifilar ESW are required. A comparison is given of the process of electroslag welding at power connection by the canonic two-electrode diagram and by the bifilar diagram with equalizing wire and doubling of secondary voltage. Given are the results of comparison of both the ESW diagrams by energy consumption; regularities of heat evolution in the slag pool at the change of its geometrical parameters, coordinates of the points and extent of immersion of the electrodes, value of voltage applied to the electrodes and electrode feed rate were studied. 9 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: electroslag welding, bifilar diagram, slag pool, metal pool, electric conductivity

Надійшла до редакції 13.09.2021

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОЯВИ ДЕФЕКТІВ В ЗВАРНИХ СТИКАХ ТРАМВАЙНИХ РЕЙОК, ВИКОНАНИХ ТЕРМІТНИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Е. Турик¹, І.О. Рябцев², М. Ломозік¹, К. Красновський¹

¹Дослідницька мережа Лукасевич – Інститут зварювання, 44-100, м. Глівіце, вул. Бл. Чеслава 16-18, Польща.
E-mail: is@is.gliwice.pl

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

Представлені результати досліджень причин втомного руйнування стиків рейок двох нових трамвайних колій, виконаних термітним зварюванням двома організаціями. Проведено контрольний аналіз хімічного складу і механічних властивостей матеріалу рейок; аналіз хімічного складу швів; макро- та мікроскопічні дослідження зварного шва, ЗТВ і основного металу; дослідження твердості в цих зонах. Встановлено, що потенційною причиною появи тріщин є скупчення пор і поодинокі мікротріщини в металі зварних швів. Визначено порушення технологічного процесу термітного зварювання трамвайних рейок, що призводять до утворення цих дефектів. Виявлені дефекти є результатом наступних факторів, пов'язаних з невиконанням вимог стандарту по термітному зварюванню трамвайних рейок і системи забезпечення якості зварювальних робіт: порушеннями технології зварювання і недостатнім контролем на відповідних етапах виробничого процесу. Бібліогр. 12, рис. 7.

Ключові слова: термітне зварювання, трамвайні рейки, втомні тріщини, пористість, мікротріщини, система забезпечення якості

Вимоги до термітного зварювання рейок на трамвайних маршрутах і атестацію процедури термітного зварювання трамвайних рейок регулює Європейський стандарт PN-EN 16771:2017-01 [1], а вимоги до хімічного складу металу термітних зварних швів наведені в стандарті PN-EN 14730-1:2017-06 [2]. Додатково рекомендується, щоб виконавець робіт дотримувався вимог до якості виконання зварювання по стандарту EN ISO 3834-2 [3]. При дотриманні цих вимог забезпечується належна якість стиків і їх довговічність, що підтверджує багаторічний досвід експлуатації безстикових рейкових шляхів, які виконано термітним зварюванням.

Останнім часом у Польщі виникла проблема втомного руйнування стиків рейок нових трамвайних колій, виконаних термітним зварюванням, що підтверджується публікаціями на різних сайтах. У даній статті розглянуто два випадки поломки рейок на трамвайних лініях, побудованих двома організаціями. На трамвайному маршруті «А» після трьох місяців експлуатації були виявлені тріщини

втомного типу в зварних стиках жолобчастих рейок 60R2 (Тв-60) зі сталі R260, виконаних термітним зварюванням першою організацією. На одній ділянці трамвайного маршруту з приблизно 1000 зварних стиків зруйнувалися 32. На трамвайному маршруті «Б» аналогічні тріщини були виявлені в 90 зварних стиках з 150. Термітне зварювання стиків рейок на цьому маршруті виконувала друга організація.

Тріщини, які призвели до руйнування рейок, спочатку поширювалися поперек зварного стику приблизно на половині висоти шийки рейки (рис. 1, а). Довжина тріщин сягала 20 см. Потім тріщини змінювали напрямок на 90° в сторону головки і підшви рейки і відбувалося повне руйнування стику (рис. 1, б).

Метою цієї роботи було визначення дефектів зварювання, які можуть бути причиною появи втомних тріщин в зварних стиках трамвайних рейок і визначення технологічних операцій, в яких, імовірно, відбулося порушення режимів термітного зварювання.

Дослідження причин появи тріщин в зварних стиках трамвайного маршруту «А». Було узгодже-

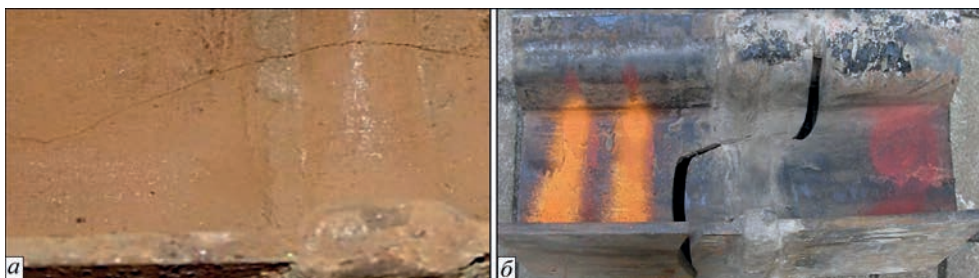


Рис. 1. Первісна тріщина (а) і характер руйнування трамвайних рейок в зоні зварного стику (б)

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>

© Е. Турик, І.О. Рябцев, М. Ломозік, К. Красновський, 2021

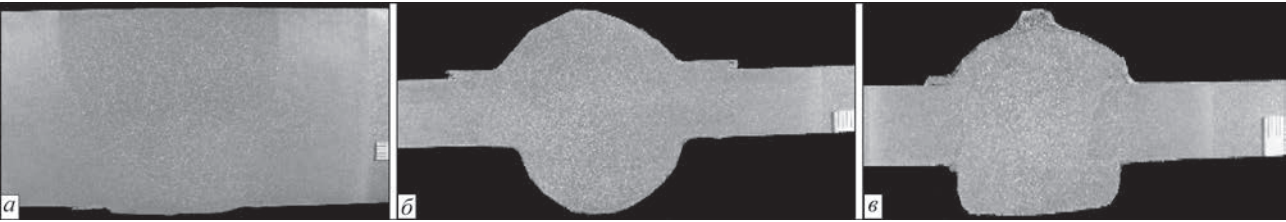


Рис. 2. Макроструктура зварного стику в зоні головки (а), шийки (б) і підшви (в) рейок

но наступний обсяг випробувань для визначення дефектів зварювання, які можуть бути потенційною причиною появи втомних тріщин в двох зварних стиках С1 і С2 рейок маршруту «А»:

- контрольний аналіз хімічного складу і механічних властивостей матеріалу рейок – зварні стики № С1 (рейки № 1 і 2) і № С2 (рейки № 3 і 4);
- контрольний аналіз хімічного складу зварних швів, які виконано термітним зварюванням;
- металографічні дослідження і дослідження розподілу твердості зварного шва, ЗТВ і основного металу;
- металографічні дослідження і дослідження розподілу твердості поза зоною руйнування в області підшви і головки рейок.

Аналіз хімічного складу матеріалу рейок №№ 1–4 проводили на оптико-емісійному спек-

трометрі Q4 Tasman фірми BRUKER. Встановлено, що хімічний склад матеріалу рейок відповідає вимогам стандарту EN 14811:2019 [4]. Міцність на розтяг $\sigma_B = 911,3 \dots 991,6$ МПа і відносне подовження $\delta_5 = 13,0 \dots 16,3$ % матеріалу рейок № 1–4 також відповідають вимогам стандарту для сталі R260: $\sigma_B \geq 880$ МПа, $\delta_5 \geq 10$ %. Аналіз хімічного складу зварних стиків С1 і С2, виконаних термітним способом, показав, що вміст легуючих елементів в швах також відповідає вимогам стандарту PN-EN 14730-1:2017-06 [2]. Дослідження макроструктури зварних з'єднань в зоні головки, шийки і підшви рейок не виявили дефектів зварювання у вигляді несплавлень, непроварів і шлакових включень (рис. 2, а–в).

Однак в зварних стиках С1 і С2 в зоні руйнування виявлені скупчення дрібних пор (рис. 3).

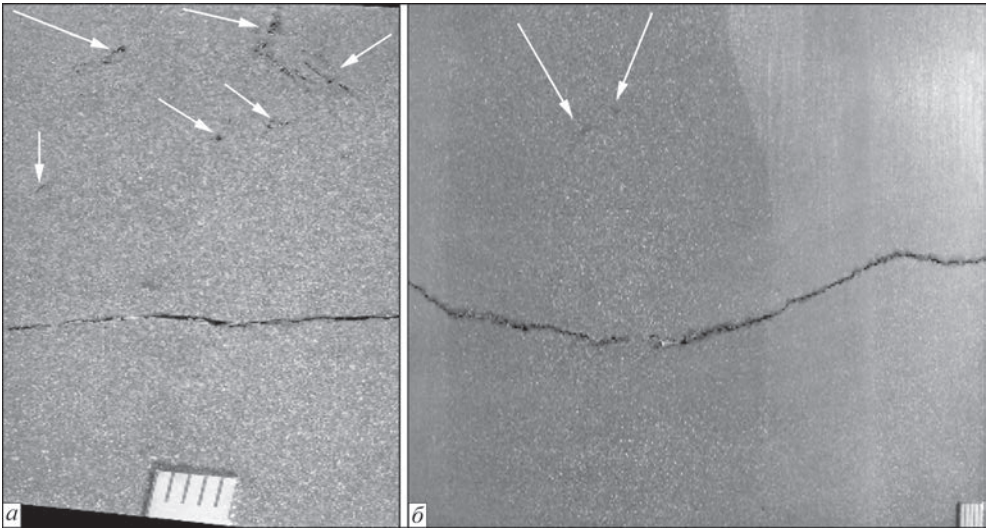


Рис. 3. Макроструктура зварних стиків С1 (а) і С2 (б) в зоні тріщини (стрілками позначені скупчення газових пор)

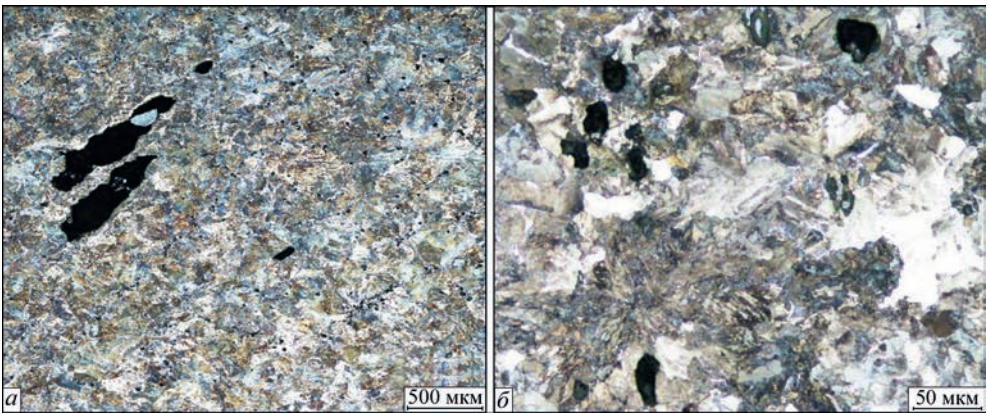


Рис. 4. Мікроструктура зварних стиків С1 (а) і С2 (б) в зоні тріщини. Пори в зварних швах.

Пористість зварних швів була підтверджена мікроскопічними дослідженнями (рис. 4). Причиною утворення пор є зменшення розчинності газів при зниженні температури. Якщо охолодження зварного стику йде занадто швидко, зростає ймо-

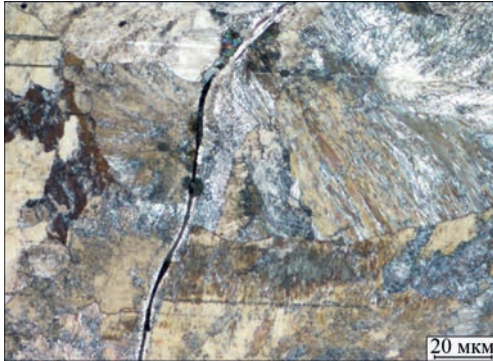


Рис. 5. Мікроструктура зварного шва стику C1 в зоні тріщини

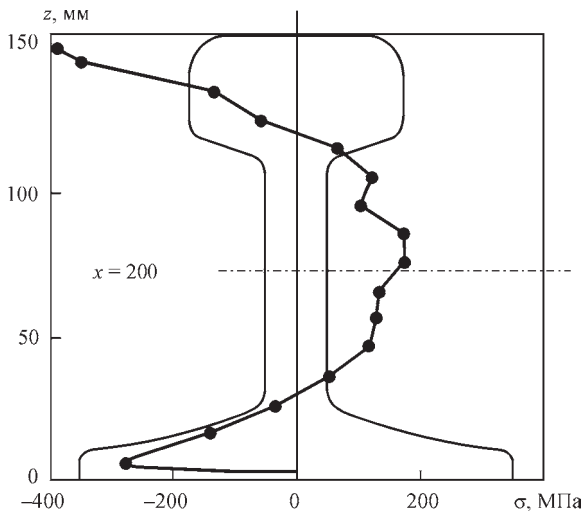


Рис. 6. Розподіл залишкових напружень в стикі рейок, виконаному термітним зварюванням [5]

вірність того, що бульбашки газів не встигнуть спливи і утворюються пори.

Дослідження мікроструктури показали, що матеріал рейок має перлітно-бейнітну структуру з невеликою кількістю фериту. Несприятливої мартенситної структури в ЗТВ не виявлено. Дослідження твердості підтвердило цей факт – твердість ЗТВ не перевищувала $HV\ 325$.

У зварному шві з'єднання C1 на ділянці шийки рейки виявлені одиничні мікротріщини по межах зерен, що виникають на значній відстані від магистральної тріщини (рис. 5).

Мікротріщини, мабуть, є результатом впливу розтягуючих напруг, які викликають пластичну деформацію металу шва. Виникненню мікротріщин сприяє поява на межах зерен рідких плівок легкоплавких евтектик, що мають температуру затвердіння набагато нижче за температури затвердіння заліза.

Газові пори і мікротріщини в зварних стиках C1 і C2 трамвайного маршруту «А» сприяють виникненню втомних тріщин, які утворилися в шийці рейок, в зоні найвищих залишкових напружень розтягу (рис. 6).

Дослідження причин появи тріщин в зварних стиках трамвайного маршруту «Б». Предметом дослідження служили два зруйнованих стику № I та № II трамвайних рейок 60R2, виконаних методом SRZ [6]. Випробування механічних властивостей показали, що матеріал рейок не відповідає вимогам PN-EN 14811:2019-06 щодо мінімального подовження для сталі R260, а межа міцності, межа плинності і відносне подовження значно відрізняються від даних в акті за результатами приймальних випробувань 3.1 по EN 10204:2017 [7].

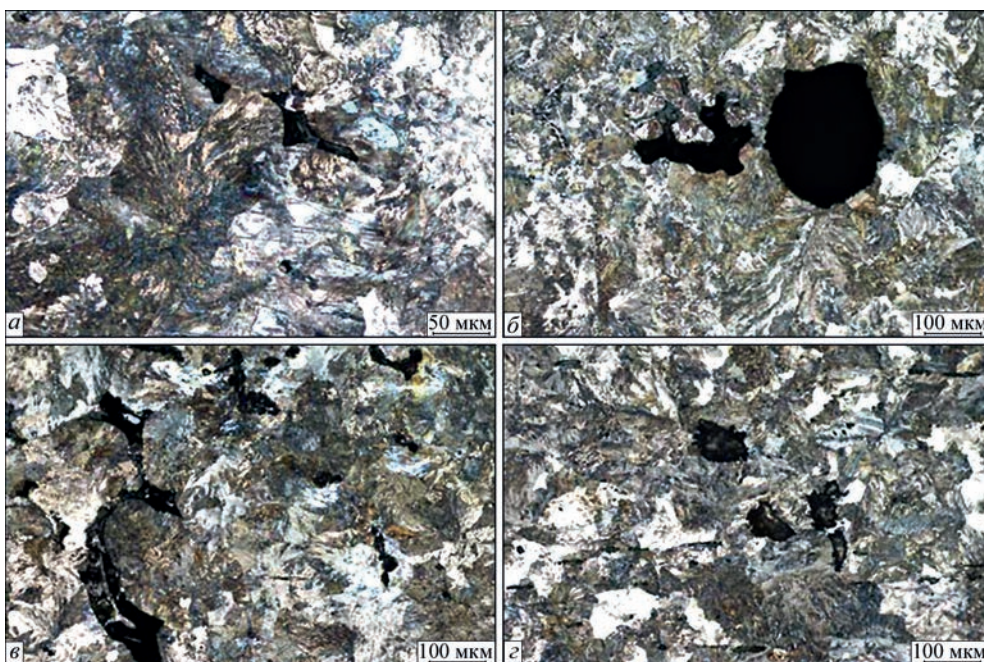


Рис. 7. Газові пори в голівці (а, в) та підшві (б, г) рейок зварних стиків I і II, відповідно

Використання неякісного матеріалу рейок зі зниженими пластичними властивостями свідчить про недостатній контроль перед зварюванням, що не відповідає вимогам EN ISO 3834-2:2019, п. 14.2.

Недостатній контроль перед зварюванням підтверджує також відсутність сертифікатів кваліфікації зварників термітного зварювання трамвайних рейок методом SRZ. Були представлені сертифікати по PN-EN 14730-2:2006 [8] кваліфікації зварників термітного зварювання залізничних рейок методом зварювання SoWoS [9, 10] без посилення, з верхнім підігрівом решт рейок і методом SkV [11, 12] з коротким часом підігріву. Це не відповідає вимогам EN ISO 3834-2:2019, п. 7.2.

Металографічними дослідженнями виявлені скупчення пор в зварних швах стиків I і II в області головки і підшви рейок (рис. 7).

В результаті досліджень встановлено ймовірні причини передчасного втомного руйнування зварних стиків рейок трамвайного маршруту «Б»:

а) використання матеріалу рейок, яке не відповідає технічним вимогам стандартів, зі зниженими пластичними властивостями;

б) порушення технології термітного зварювання, внаслідок яких в металі зварних швів рейок виявлено мікротріщини і скупчення газових пор в їх зоні;

в) недостатній технічний нагляд за технологією термітного зварювання рейок, про що свідчать:

- неповні операційні карти зварювання WPS (не вказані температура і час попереднього підігріву, висота пальника над головкою рейки, час від закінчення заливки термітного розплаву в форму до обрубки обливу з верхньої частини головки рейки і по радіусним частинам);

- відсутність сертифікатів кваліфікації зварників термітного зварювання трамвайних рейок методом SRZ.

Висновки

1. У металі зварних стиків рейок C1 і C2 маршруту «А» виявлено дефекти зварювання у вигляді скупчень газових пор, які утворюються внаслідок занадто швидкого охолодження металу шва. Пористість виявлена також в зварних стиках I і II рейок маршруту «Б».

2. У зварному стику C1 маршруту «А» на ділянці шийки рейки виявлені недопустимі дефекти зварювання у вигляді поодиноких мікротріщин по межах зерен.

3. Поява газових пор і мікротріщин пов'язана з наступними порушеннями технологічного процесу термітного зварювання трамвайних рейок:

- низька температура і короткий час попереднього підігріву кінців рейок;
- нерівномірний нагрів зварювальних кінців рейок;

- занижений рекомендований технологією зазор між кінцями рейок перед зварюванням;

- швидке охолодження металу зварного шва через передчасне зняття формуючого пристрою (занадто короткий час від випуску металу з тигля до зняття формуючого пристрою).

4. Виявлені дефекти є результатом двох факторів, пов'язаних з невиконанням виконавцями вимог стандарту по термітному зварюванню трамвайних рейок і системи забезпечення якості зварювальних робіт:

- порушеннями технології зварювання;
- недостатнім контролем на відповідних етапах виробничого процесу: неповні операційні карти зварювання WPS, відсутність сертифікатів кваліфікації зварників термітного зварювання трамвайних рейок методом SRZ, а в разі трамвайного маршруту «Б» також матеріал рейок, що не відповідає специфікації.

5. Виявлені дефекти зварювання (газові пори і мікротріщини) є потенційною причиною появи втомних тріщин зварних з'єднань трамвайних рейок в процесі експлуатації.

Список літератури/References

1. PN-EN 16771:2017-01 *Railway applications – Infrastructure – Aluminothermic welding of grooved rails.*
2. PN-EN 14730-1:2017-06 *Railway applications – Track – Aluminothermic welding of rails. Part 1: Approval of welding processes.*
3. ДСТУ EN ISO 3834-2:2019 *Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 2. Всебічні вимоги до якості.*
4. PN-EN 14811:2019-06 *Railway applications. Track. Special purpose rail. Grooved rails and associated construction profiles.*
5. Lawrence F.V., Chen Y-R., Cyre J.P. *Improving the fatigue resistance of thermite railroad rail weldments.* <http://fc.mechse.illinois.edu/files/2014/07/Lawrence-presentation.pdf>
6. *Thermit SRZ/SRZ L50/SRE welding process for grooved rails.* https://www.elektro-thermit.de/fileadmin/et/user_upload/PDF/Produktbrosch%C3%BCren/SRZ_SRE_DEF.pdf
7. ДСТУ EN 10204:2017 *Вироби металеві. Види документів контролю.*
8. PN-EN 14730-2:2006 *Railway applications – Track – Aluminothermic welding of rails. Part 2: Qualification of aluminothermic welders, approval of contractors and acceptance of welds.*
9. (2010) *Code of Practice for the THERMIT – Quick Welding Procedure SoWoS.* Elektro-Thermit GmbH & Co KG.
10. (2019) *Instrukcja spawania szyn termitem Id-5.* PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
11. *Code of Practice for the THERMIT – Quick Welding Procedure SkV.* Elektro-Thermit GmbH & Co KG, 2010. https://www.thermit.com.au/media-centre/technical-information/PI_8.5.1-296_TA_TS-Code-of-Practice-SkV-Elite-Welding-Procedure.pdf.
12. Электро-Термит. *Технология алюминотермитной сварки рельсов с коротким временем подогрева (SkV, SkV-L 50, SkV-L 75).* <https://docplayer.com/27763010-Elektro-thermit-tehnologiya-alyuminotermiitnoy-svarki-relov-s-korotkim-vremenem-podogreva-skv-skv-l-50-skv-l-75.html>. Elektro-Thermit. *Technology of aluminothermic welding of rails with short time of heating (SkV, SkV-L 50, SkV-L 75).*

INVESTIGATION OF THE CAUSES FOR APPEARANCE OF DEFECTS IN WELDED BUTT JOINTS OF TRAM RAILS MADE BY THERMIT WELDING

E. Turik¹, I.O. Ryabtsev², M. Lomozik¹, K. Krasnovskyi¹

¹Lucasiewicz Research Network – Institute of Welding, 44-100, Gliwice, 16-18 Bl. Czeslava, Poland. E-mail: is@is.gliwice.pl

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The results of investigations of the causes for fatigue fracture of rail butt joints on two new tram tracks, made by thermit welding by two organizations are presented. Control analysis of the chemical composition and mechanical properties of the rail material; analysis of the chemical composition of the welds; macroscopic and microscopic investigations of the weld, HAZ and base metal; and hardness studies in these zones were performed. It was found that pore accumulation and isolated microcracks in the weld metal are the potential cause for cracking. Violations of the technological process of thermit welding of the tram tracks were determined, which lead to appearance of these defects. The detected defects are the result of the following factors, associated with failure to meet the standard requirements on thermit welding of tram tracks and of the system of ensuring the quality of welding operations, namely violation of welding technology and insufficient control at the respective stages of the production process. 12 Ref., 7 Fig.

Keywords: thermit welding, tram tracks, fatigue cracks, porosity, microcracks, quality assurance system

Надійшла до редакції 16.09.2021

VI Міжнародна конференція

ТИТАН 2022: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

30 травня – 1 червня 2022 р.

Голова програмного комітету
академік С.В. Ахонін



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Національний університет «Запорізька політехніка»
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



Тематика конференції

- Технології та обладнання для отримання губки, злитків та відливок з титану та його сплавів
- Адитивні технології в виробництві виробів з титанових сплавів
- Деформаційна обробка титану
- Виробництво та використання порошків титану
- Структура та властивості титанових сплавів
- Нові сплави на основі титану та інтерметалідів титану
- Інженерія поверхні титанових сплавів
- Технології зварювання та пайки титанових сплавів
- Застосування виробів та конструкцій з титану та сплавів на його основі в промисловості

Контрольні дати

Надання заявки на участь в конференції та тез доповідей до 12.05.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі до 19.05.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску до 30.05.2022 р.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
вул. Казимира Малевича, 11,
м. Київ, 03150, Україна
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/ukr/titan2022

Інформаційна підтримка:
«Сучасна електрометалургія»
«Автоматичне зварювання»
«Biuletyn Instytutu Spawalnictwa»



Нова книга



Електронно-лучевая сварка. Технологии. Оборудование. Материалы: Сб. статей под ред. чл.-кор. НАН Украины В.М. Нестеренкова. — Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2021. — 390 с.

Сборник включает 38 статей сотрудников отдела «Физические процессы, техника и оборудование для электронно-лучевой и лазерной сварки» Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 2011–2020 гг. В нем обобщен опыт научно-исследовательской и инженерной деятельности отдела в области электронно-лучевой сварки. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами соединения металлов с помощью высококонцентрированных источников нагрева, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы электронно-лучевой сварки и родственных процессов.

ВИМОГИ ДО ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИН КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

Ю.М. Ланкін

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lankin.y.n@gmail.com

Зварювання деталей товщиною до 0,5 мм зазвичай називають мікрозварюванням. Контактне мікрозварювання широко застосовується в електроніці та приладобудуванні. Теплова інерційність зварюваних деталей при контактному зварюванні пропорційна квадрату їх товщини. Внаслідок малої теплової інерційності деталей при мікрозварюванні зміна їх температури близька до зміни в часі зварювального струму промислової частоти 50 Гц. Для виключення пульсацій температури контактне мікрозварювання необхідно проводити імпульсами постійного струму або зварювальним струмом високої частоти. При мікрозварюванні початковий контактний опір деталь-деталь перевищує власний опір зварюваних деталей в десятки разів. Для зменшення початкових виплесків розплавленого металу і стабілізації якості зварного з'єднання при мікрозварюванні необхідне плавне зростання зварювального струму. Бібліогр. 12, табл. 2.

Ключові слова: контактне мікрозварювання, теорія подібності, теплова інерційність, частота зварювального струму, типові режими зварювання

Контактне зварювання – найбільш продуктивний спосіб зварювання, який охоплює до 50 % зварювальної продукції в загальному обсязі всіх способів зварювання [1]. Зварювання деталей товщиною до 0,5 мм зазвичай називають мікрозварюванням. Воно широко застосовується в електроніці та приладобудуванні при виробництві автомобільної електроніки, датчиків, медичних приладів, батарей та батарейних модулів, електронних компонентів, а також при виробництві ювелірних виробів [2–4]. Часто мікрозварювання використовують при збірці кварцевих резонаторів, п'єзоелектричних приладів, конденсаторів, звичайних і твердотільних резонаторів, термопар, різних нагрівальних модулів, мініатюрних вібродвигунів, термобатарей, дистанційних решіток тепловиділяючих збірок, які працюють в активній зоні атомних реакторів, а також при герметизації корпусів мініатюрних приладів, мембранних коробок, сильфонів і монтажі електроприладів. Зустрічаються відомості [4, 5] про заміну процесу пайки при виробництві електронної апаратури та ювелірних виробів на контактне мікрозварювання, яке має в порівнянні з нею ряд серйозних переваг: відсутність припоїв і флюсів, вищі електричні характеристики отриманого з'єднання, термо- та вібростійкість, мінімальний вплив температури на з'єднувані деталі, чистіші умови виробництва та інші.

В більшості випадків вимоги, що висувуються до отриманого зварного з'єднання, обмежуються необхідною міцністю. Однак при зварюванні деталей відповідального призначення, крім високої гарантованої якості та надійності з'єднань, необхідно забезпечити їх високу повторюваність і відсутність виплесків часток розплавленого металу. Висока повторюваність необхідна при виробництві складних виробів, коли проводиться вели-

Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>
© Ю.М. Ланкін, 2021

ка кількість зварювань і від якості кожної з них в значній мірі залежить якість готового виробу [7, 8].

Особливості контактного мікрозварювання. Мікрозварювання має ряд особливостей, які створюють додаткові проблеми в технології та конструюванні обладнання. Мала товщина зварюваних деталей є причиною малої теплової інерційності зварюваних точок. За теорією подібності теплова інерційність зварюваних деталей повинна бути пропорційною квадрату товщини деталей. Експериментальне визначення величини цієї інерційності ніким не проводилось, а аналітичне рішення нестационарного нагріву зварної точки джерелом струму складної форми навіть при значних спрощуючих припущеннях досить складне. Тому оцінки інерційності відбувались шляхом математичного моделювання.

При контактному точковому мікрозварюванні діаметр електродів набагато більший за товщину зварюваних деталей. Це дозволяє уявити, що основна частина зварювального струму протікає по стовпчику металу діаметром, що дорівнює діаметру електродів, і висотою, що дорівнює сумарній товщині зварюваних деталей. При цьому спрощуючому припущенні проведено моделювання динаміки нагріву струмом частотою 50 Гц зварних точок низьковуглецевої сталі різних товщин на аналоговій ЕОМ [9]. Якщо в першому наближенні зварюваний виріб можна уявити як інерційну ланку першого порядку, то за результатами моделювання теплові постійні часу Q зварюваних деталей в діапазоні товщин $\delta = 1 \dots 0,2$ мм добре описуються рівнянням $Q = 0,057\delta^2$ с.

Таким чином, розрахункова теплова постійна часу зварної точки приблизно пропорційна квадрату товщини зварюваного металу. В результаті для низьковуглецевої сталі при частоті зварюваль-

ного струму 50 Гц пульсації температури, викликані періодичною зміною зварювального струму в часі, нехтувано малі при зварюваних товщинах більше 2,5...2,0 мм. При товщині $\delta = 1,0$ мм пульсації температури центру точки складають $< 10\%$. При зварюванні малих товщин температура зварюваної точки в процесі її формування з невеликим запізненням прямує за зміною зварювального струму, задній фронт імпульсу струму фактично не бере участь в зварюванні і нагрів (формування) точки суттєво залежить від форми імпульсу зварювального струму.

Через відносно малий власний опір деталей і малих зварюваних зусиль зростає роль контактних опорів як джерел тепла на початку зварювання. Так, за розрахунками та експериментами В.Е. Моравського [3] при зменшенні товщини листів з низьковуглецевої сталі в 40 разів (з 2,0 до 0,05 мм) значення початкових контактних опорів деталь-деталь відрізняється в 170 разів. У загальному випадку відношення контактних опорів до власного опору зварюваних деталей зворотно пропорційне їх лінійним розмірам. З цієї причини при контактному мікрозварюванні різко зростає ймовірність початкових виплесків і робить її надзвичайно чутливою до форми переднього фронту імпульсу зварювального струму.

Особливості режимів контактного точкового мікрозварювання. При зварюванні металів середніх і великих товщин на промисловій частоті зварювального струму накопичено значний досвід зі стабілізації параметрів зварної точки шляхом програмного та автоматичного регулювання параметрів процесу під час зварювання. Цей досвід майже не використовується в контактному точковому мікрозварюванні, яке за різноманіттям режимів зварювання та стабільності якості зварних з'єднань поступається контактному зварюванню звичайних товщин. Це викликано відсутністю швидкодіючих регульованих зварювальних джерел живлення.

Зварювання середніх і великих товщин проводять на зварювальних машинах змінного струму промислової частоти 50 Гц. Відповідно до критеріїв подібності [10] тривалість зварювального імпульсу пропорційна квадрату товщини зварюваного металу. Тому, якщо при зварюванні, наприклад, низьковуглецевої сталі товщиною 1 мм в середньому встановлюється час протікання зварювального струму 0,188 с, то для зварювання того ж матеріалу товщиною 0,2 мм на подібному режимі тривалість зварювання повинна бути 0,023 с, а товщиною 0,1 мм – всього 0,009 с. Регулювати час зварювання на частоті мережі 50 Гц в цьому випадку практично неможливо. Крім того, вельми важко регулювати і зварювальний струм.

При зварюванні металів середніх і великих товщин на промисловій частоті регулювання струму відбувається шляхом зміни кута включення тиристорів. Тому після 120° фази зварювального стру-

му температура зварної точки починає падати слідом за струмом і зростання розмірів розплавленого ядра припиняється. Другий напівперіод зварювального струму марний, оскільки не веде до подальшого збільшення розмірів розплавленого ядра. Звідси випливає, що зварювання сталі товщиною менше за $0,2 + 0,2$ мм на змінному струмі промислової частоти можливе тільки одним напівперіодом напруги мережі, а діапазон фазового регулювання складає $0 \dots 90^\circ$, який відрховується від кута зсуву фаз напруги та струму зварювального контура.

Для однонапівперіодного зварювання, крім управління струмом шляхом регулювання кута включення тиристора, розроблено спосіб управління струмом шляхом регулювання тривалості ввімкненого стану тиристора [10, 11]. Це здійснюється за допомогою примусового гашення тиристора, коли струм досягне заданого значення на інтервалі його зростання.

Як в першому, так і в другому випадку відсутня можливість керувати формою переднього фронту імпульсу струму. За всіма цими причинами для зварювання малих товщин в переважній більшості випадків застосовуються так звані конденсаторні машини [3].

Разом з незаперечними перевагами конденсаторних машин в області управління режимом зварювання значно поступаються машинам змінного струму для зварювання декількома періодами струму. В конденсаторних машинах вкрай важко керувати формою імпульсу зварювального струму та зовсім неможливо регулювати зварювальний струм під час зварювання. Відомі доволі незграбні спроби хоч якось змінювати природну форму струму розряда конденсатора, але всі вони призводять до різкого ускладнення зварювального джерела живлення, а можливості регулювання форми імпульсу струму вкрай обмежені [3, 11].

Відомі джерела живлення з лінійними транзисторними регуляторами [6–8, 12]. Вони мають ідеальні регульовальні характеристики, які дозволяють реалізувати будь-які зварювальні цикли та автоматичне регулювання параметрів зварювання. Нажаль, через дорожнечі та громіздкості, як і у випадку дугового зварювання, вони навряд чи знайдуть скільки-небудь широке застосування.

Принципово машини для контактного мікрозварювання нічим не будуть відрізнятися від машин для зварювання середніх і великих товщин на змінному струмі, якщо дотримуються умови подібності [9]: частота зварювального струму $f = k_6 \delta^{-2}$, опір зварювального контура $Z_k = k_5 \delta^{-1}$ та маса рухомих частин машини $m = k_7 \delta^5$. Однак при контактному мікрозварюванні залишається вплив відносно великого початкового контактного опору зварюваних деталей. Але для цього, зокрема, і необхідне розширення можливостей регулювання зварювальної машини.

Необхідні технічні характеристики машин для контактного мікрозварювання на змінному

Таблиця 1. Усереднені рекомендовані режими точкового контактного мікрозварювання низьковуглецевих сталей

δ , мм	$\overline{d_{\text{ел}}}$, мм	$\overline{F_{\text{зв}}}$, кг	$\overline{I_{\text{зв}}}$, кА	$\overline{t_{\text{зв}}}$, с	f , кГц	$\overline{P_{\text{зв}}}$, кВт	$I_{\text{зв}}^{\text{min}}$, кА	$t_{\text{зв}}^{\text{max}}$, с
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,05	1,15	12,7	2,2	0,0036	20,0	2,2	1,50	0,01
0,10	1,66	25,6	3,08	0,0090	5,00	3,08	2,09	0,026
0,15	2,05	36,2	3,74	0,0150	2,20	3,74	2,50	0,043
0,20	2,46	47,7	4,29	0,0224	1,25	4,29	2,90	0,065
0,25	2,68	59,0	4,78	0,0300	0,80	4,78	3,25	0,87

Таблиця 2. Рекомендовані м'які режими точкового контактного мікрозварювання низьковуглецевих сталей

δ , мм	$d_{\text{ел}}$, мм	$j_{\text{зв}}^{\text{min}}$, кА/мм ²	$I_{\text{зв}}^{\text{min}}$, А
0,05	1,0	1,056	0,875
0,10	1,0	0,743	0,583
0,15	1,0	0,607	0,477
0,20	1,5	0,526	0,929
0,25	1,5 (2,0)	0,470	0,830 (1,476)

струмі. В електроніці та приладобудуванні контактним мікрозварюванням зварюються вироби в діапазоні товщин 0,05...0,25 мм. Екстраполюємо дані за режимами зварювання середніх і великих товщин та мікрозварювання. Найбільш повно досліджено режими зварювання низьковуглецевої сталі як найбільш розповсюджені. Статистична обробка всіх доступних баз даних режимів контактного зварювання низьковуглецевої сталі в діапазоні товщин $\delta = 0,5...7,3$ мм дала наступні залежності для усереднених режимів зварювання:

$$\left. \begin{aligned} \overline{d_{\text{ел}}} &= 5,5 \cdot \delta^{0,526} \\ \overline{F_{\text{зв}}} &= 222 \cdot \delta^{0,956} \\ \overline{I_{\text{зв}}} &= 9,264 \cdot \delta^{0,478} \\ \overline{t_{\text{зв}}} &= 0,188 \cdot \delta^{1,32} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Розраховані за (1) режими зварювання для діапазону товщин 0,05...0,25 мм наведено в табл. 1.

В табл. 1 наведено необхідні для зварювання малих товщин частоти зварювального струму, при яких пульсації температури точки будуть такі ж, як при зварюванні товщин 1,0 + 1,0 мм на частоті 50 Гц.

Аналіз табл. 1 показує, що при зварюванні на усереднених режимах потрібно досить значні струми і потужність джерела живлення. У цьому стовпці наведено потужність, яка виділяється в зварюваній точці при напрузі на точці 1 В, яка, як відомо, майже не змінюється зі зміною товщини зварюваних деталей.

На практиці великі товщини зварюють на м'яких режимах для зменшення потужності, середні – на жорстких для збільшення продуктивності. Малі товщини також зварюють на м'яких режимах, щоб не використовувати важко досяжний малий час зварювання, при якому крім того, як показано вище, неможливе гнучке регулювання струму. При зварюванні на підвищених частотах збільшення часу зварювання для малих товщин втрачає актуальність, оскільки кількості періодів зварювального струму,

що збільшується зі збільшенням частоти, цілком достатньо для регулювання струму. Але зменшення необхідної потужності зварювального джерела живлення дуже важливе, оскільки спрощує транзисторний високочастотний силовий генератор.

Формули (1) наведено для середніх параметрів режимів. Отримати зварну точку одних і тих же розмірів можна при різноманітних поєднаннях $I_{\text{зв}}$ та $t_{\text{зв}}$. Обробка даних експериментальних режимів показала, що взаємозв'язок струму з часом зварювання можна описати наступною комплексною залежністю:

$$I_{\text{зв}}^2 t_{\text{зв}}^{0,7} = 25,7 \delta^{1,8} \quad (2)$$

Розкид експериментальних даних навколо цієї лінії регресії набагато менший, ніж для кожної зі складових окремо. Згідно з цією залежністю зі збільшенням $t_{\text{зв}}$ зварювальний струм $I_{\text{зв}}$ знижується і навпаки. Границі варіювання цих параметрів обмежуються наступним – зварювальний струм можна збільшувати з відповідним зменшенням часу зварювання, доки не почнеться виплескування з-під електрода на початку імпульсу струму; час зварювання можна збільшувати з відповідним зменшенням зварювального струму, поки вмістину від електрода не перевищить 15 % товщини зварюваного листа. В першому випадку режим зварювання називають гранично жорстким, в другому – гранично м'яким. Природно, для м'яких режимів необхідна потужність джерела живлення менша, ніж для жорстких.

Обробка режимів зварювання низьковуглецевої сталі товщиною 0,9...1,0 мм показує, що діапазон варіювання допустимого струму від середнього для граничних режимів складає $\pm 32\%$. Таким чином, дані табл. 1 можна відкоригувати для м'яких режимів (стовпці 8 і 9). Ці дані відповідають просто рекомендованим м'яким режимам, а аж ніяк не гранично м'яким.

Реально для мікрозварювання використовуються електроди діаметром 1...2 мм [3], табл. 2.

З іншої сторони, для гранично м'яких режимів справедлива залежність:

$$j_{зв}^{\min} = \frac{0,089\sqrt{p}}{\delta^{0,5}}, \quad (3)$$

де $j_{зв}^{\min}$ – мінімальна щільність струму; p – пито-
мий тиск електродів.

В табл. 2 наведено розраховані за (3) величи-
ни $j_{зв}^{\min}$, які відповідають значенням мінімально-
го зварювального струму для застосовуваних на
практиці електродів і $p = 7$ кг/мм². В результаті
виходить, що весь діапазон товщин, що нас цікав-
лять, можна зварити на струмі близько 1 кА.

Висновки

Теплова постійна часу зварюваних листів про-
порційна квадрату товщини листів.

Для низьковуглецевої сталі коефіцієнт пропор-
ційності теплової постійної часу квадрату товщи-
ни зварюваних листів $\approx 0,06$ с/мм².

Для того, щоби пульсації температури при
зварюванні низьковуглецевої сталі товщиною
0,1 + 0,1 мм, які обумовлені тепловою інерційністю
зварної точки, були такими ж, як і при зварюван-
ні сталі товщиною 1,0 + 1,0 мм на частоті 50 Гц,
частота зварювального струму повинна бути 5 кГц.

Низьковуглецеву сталь товщиною 0,05...0,25 мм
можна зварювати на м'яких (як при зварюванні
середніх товщин) режимах, застосовуючи зварю-
вальні струми до 1 кА.

Список літератури

1. Баннов М.Д. (2005) *Технология и оборудование контактной сварки*. Москва, Академия.
2. Атауш В.Е., Леонов В.П., Москвин Э.Г. (1996) *Микро-
сварка в приборостроении*. Рига, РТУ.
3. Моравский В.Э., Ворона Д.С. (1985) *Технология и обо-
рудование для точечной и рельефной конденсаторной свар-
ки*. Киев, Наукова думка.
4. Колупаев Ю.Ф., Привезенцев В.И. (2003) Особенности
конденсаторной сварки никрома при изготовлении юве-
лирных изделий. *Сварочное производство*, **11**, 41–43.
5. Паэрэнд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. (2005) Особенности
формирования импульсов тока для малогабаритных де-
талей. *Технічна електродинаміка. Тем. вип. силова елек-
троніка та енергоефективність*, Ч. 3, 28–31.
6. Паэрэнд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. (2006) Применение им-
пульсов специальной формы для контактной микросвар-
ки. *Труды седьмой Междунар. научно-практ. конф. «Со-*

*временные информационные и электронные технологии»
(СИЭТ-2006)*. Т. 2. Одесса, ДП Нептун, Технологія.

7. Паэрэнд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. (2006) Источник пита-
ния для контактной микросварки с программируемой
формой сварочного импульса. *Технология и конструиро-
вание в электронной аппаратуре*, **4**, 51–54.
8. Ланкин Ю.Н. (1967) Электромоделирование тепловых
процессов при контактной точечной сварке. *Автомати-
ческая сварка*, **7**, 23–26.
9. Лебедев В.К., Яворский Ю.Д. (1960) Применение кри-
териев подобия для определения режимов контактной
сварки. *Там же*, **8**, 37–44.
10. Патон Б.Е., Лебедев В.К. (1969) *Электрооборудование
для контактной сварки. Элементы теории*. Москва, Ма-
шиностроение.
11. Патон Б.Е., Гавриш В.С., Гродецкий Ю.С. (1963) Безинер-
ционные схемы автоматического регулирования процес-
сов контактной сварки. *Автоматическая сварка*, **5**, 7–10.
12. Леонов В.П., Барабанщикова Л.А., Греченкова А.А., Атауш
В.Е. (1990) Управляемый источник тока «САРМ-1» для кон-
тактной микросварки. *Сварочное производство*, **10**, 36–38.

References

1. Bannov, M.D. (2005) *Resistance welding technology and
equipment*. Moscow, Akademiya [in Russian].
2. Ataush, V.E., Leonov, V.P., Moskvina, E.G. (1996) *Microw-
elding in instrument engineering*. Riga, RTU [in Russian].
3. Moravsky, V.E., Vorona, D.S. (1985) *Technology and equip-
ment for spot and projection capacitor-discharge welding*.
Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Kolupaev, Yu.F., Privezentsev, V.I. (2003) Peculiarities of ca-
pacitor-discharge welding of nichrome in producing of jev-
ellery. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 41–43 [in Russian].
5. Paerand, Yu.E., Bondarenko, A.F. (2005) Peculiarities of for-
mation of current pulses for small-size parts. *Tekhnichna Ele-
ktrodynamika. Tem. Issue: Power Electronics and Power Ef-
ficiency*, Pt 3, 28–31 [in Russian].
6. Paerand, Yu.E., Bondarenko, A.F. (2006) Application of special
shape pulses for resistance microwelding. In: *Proc. of 7th Int.
Sci.-Pract. Conf. on Modern Information and Electronic Tech-
nologies (MIET-2006)*, Vol.2. Odessa, SE Neptun, Tekhnologiya.
7. Paerand, Yu.E., Bondarenko, A.F. (2006) Power supply for
resistance microwelding with programmable shape of weld-
ing pulse. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Ap-
parature*, **4**, 51–54 [in Russian].
8. Lankin, Yu.N. (1967) Electromodeling of thermal processes in re-
sistance spot welding. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 23–26 [in Russian].
9. Lebedev, V.K., Yavorskiy, Yu.D. (1960) Application of simi-
larity criteria for determination of resistance welding modes.
Ibid., **8**, 37–44 [in Russian].
10. Paton, B.E., Lebedev, V.K. (1969) *Electric equipment for re-
sistance welding. Theory elements*. Moscow, Mashinostroe-
nie [in Russian].
11. Paton, B.E., Gavrish, V.S., Grodetzky, Yu.S. (1963) Inertia-
less diagrams of automatic regulation of resistance welding
processes. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 7–10 [in Russian].
12. Leonov, V.P., Barabanshchikova, L.A., Grechenkova, A.A., Ataush,
V.E. (1990) Controllable power supply SARM-1 for resistance mi-
crowelding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **10**, 36–38 [in Russian].

REQUIREMENTS TO TECHNICAL CHARACTERISTICS OF RESISTANCE MICROWELDING MACHINES

Yu.M. Lankin

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

E-mail: lankin.y.n@gmail.com

Welding of up to 0.5 mm thick parts is usually called microwelding. Resistance microwelding is widely applied in electronics and instrument-making. Thermal inertia of welded parts at resistance welding is proportional to the square of their thickness. As a result of low thermal inertia of parts at microwelding, the change of their temperature is close to the change in time of welding current of 50 Hz industrial frequency. In order to eliminate the ripple, resistance microwelding should be conducted by direct current pulses or high-frequency welding current. At microwelding the initial part-part contact resistance is tens of times higher than that of the parts being welded. To reduce the initial splashes of molten metal and stabilize the welded joint quality, the welding current should increase smoothly at microwelding. 12 Ref., 2 Tabl.

Keywords: resistance microwelding, similarity theory, thermal inertia, welding current frequency, typical welding modes

Надійшла до редакції 01.09.2021

КОМПОЗИЦІЙНІ ПОРОШКИ НА ОСНОВІ АМОРФІЗУЮЧОГО СПЛАВУ FeMoNiCrB З ДОБАВКАМИ ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК ДЛЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

Ю.С. Борисов¹, А.Л. Борисова¹, О.М. Бурлаченко¹, Т.В. Цимбалиста¹, М.А. Васильківська², Є.Г. Биба³

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

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижановського 3

³Інститут матеріалознавства і зварювання ім. Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, просп. Перемоги, 37

Досліджено процес отримання методом механічного легування композиційних порошків на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з добавками тугоплавких сполук (ZrB_2 , $(Ti, Cr)C$ і $FeTiO_3$) шляхом обробки суміші порошків компонентів в планетарному млині «Активатор 2SL». Встановлено, що після 1,5 год обробки її продукти являють собою однорідні конгломерати із середнім розміром частинок, що залежить від складу композиційних порошків, який у випадку FeMoNiCrB+ ZrB_2 складав 23 мкм, FeMoNiCrB+(Ti, Cr)C – 15 мкм, а FeMoNiCrB+ $FeTiO_3$ – 25 мкм. Результати РСФА свідчать про формування в отриманих композиційних порошках аморфно-нанокристалічної структури, що складається з твердого розчину Fe(Ni, Cr), Mo_2FeB_2 і дисперсної фази добавок тугоплавких сполук (ZrB_2 , $(Ti, Cr)C$ і $FeTiO_3$) з ознаками деякої міжфазної взаємодії FeMoNiCrB і $(Ti, Cr)C$, при цьому аморфна фаза з'являється в результаті процесу механічного легування. Величини вимірної мікротвердості склали у композиційних порошків FeMoNiCrB+ ZrB_2 – $6,2 \pm 1,6$ МПа, FeMoNiCrB+(Ti, Cr)C – $5,5 \pm 1,1$ МПа, FeMoNiCrB- $FeTiO_3$ – $5,1 \pm 0,7$ МПа. Для використання в газотермічному напиленні покриттів з аморфною структурою з отриманих композиційних порошків продуктів механічного легування формують конгломератні порошки з розміром частинок і ступенем плинності, які задовольняють вимогам технології газотермічного напилення. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 12.

Ключові слова: аморфізуючий сплав, тугоплавкі сполуки, композиційний порошок, механічне легування, структура, фазовий склад, гранулометричний склад

Прогрес у створенні газотермічних покриттів (ГТН) з підвищеними функціональними характеристиками багато в чому визначається розробкою нових типів матеріалів для їх нанесення, в тому числі композиційних порошків (КП).

До перспективних матеріалів для ГТН відносяться сплави з аморфною структурою, які характеризуються поєднанням комплексів таких властивостей, як висока міцність, зносостійкість, корозійна стійкість, висока межа плинності, висока магнітна проникність і мала коерцитивна сила, високий електроопір, надпровідність [1, 2].

Формування аморфної структури матеріалів відбувається в результаті придушення процесів зародкоутворення та кристалізації, що досягається при надшвидкому загартуванні або шляхом введення дефектів у кристалічну структуру металів [2]. Охолодження частинок при формуванні шару покриття в умовах процесу газотермічного напилення зі швидкістю $\sim 10^6$ К/с створює можливість для отримання на поверхні деталей покриттів з метастабільною аморфною структурою [3].

Серед аморфних газотермічних покриттів, які є перспективними для промислового застосування на деталях, що працюють в умовах зношування,

слід виділити сплави на основі заліза, які характеризуються високими значеннями механічної міцності та корозійної стійкості, низькою вартістю [4]. Проте їх низькі значення зносостійкості при сухому терті та погана стійкість до ударних навантажень обмежують діапазон можливих областей застосування таких покриттів [5].

Поліпшення механічних властивостей аморфних покриттів на основі заліза може бути досягнуто шляхом введення в аморфну матрицю дисперсних частинок. Так, використання в якості включень WC/12Co дозволило підвищити адгезійну міцність і збільшити в чотири рази стійкість до тертя/зношування в порівнянні з покриттям на основі заліза, що має чисто аморфну структуру [5]. Збільшення зносостійкості аморфних покриттів спостерігається також при використанні дисперсних включень TiN і B_4C [6, 7].

Важливим фактором, який впливає на властивості ГТН-покриттів, є однорідність їх структури. В роботі [8] показано, що ГТН-покриття, отримані з механічної суміші порошків, не мають однорідності складу по товщині покриття, що позначається на міцності зв'язку зміцнюючої фази з матеріалом матриці. У той же час покриття з КП мають

Борисов Ю.С. – <https://orcid.org/0000-0002-6019-8464>, Борисова А.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-7376-3370>,

Бурлаченко О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-2095>, Цимбалиста Т.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9569-7776>,

Васильківська М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-8311-6428>, Биба Є.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

© Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, О.М. Бурлаченко, Т.В. Цимбалиста, М.А. Васильківська, Є.Г. Биба, 2021

шарувату тонколамелярну структуру та відрізняються більш високим ступенем щільності та однорідності [9].

До основних способів отримання КП відносяться плакування і конгломерування, а також комбінація цих методів [10]. Серед сучасних методів отримання КП слід виділити методи механічного легування (МЛ) та механохімічного синтезу (МХС).

Процес виробництва КП методом МЛ або МХС полягає в обробці його компонентів у вигляді порошку в високоенергетичних кульових млинах з високим вмістом подрібнюючих куль. У процесі механічної обробки відбувається зіткнення куль між собою, в результаті чого виділяється енергія. Зіткнення куль носить імпульсний характер протягом малого проміжку часу $10^{-12} \dots 10^{-13}$ с і при попаданні в контактну область частинок порошоків енергія частково витрачається на їх деформацію і подрібнення, а частково веде до зростання їх внутрішньої енергії. Релаксація внутрішньої енергії відбувається різними шляхами: виділенням тепла; розмноженням та міграцією дефектів кристалічної будови; утворенням внутрішніх поверхонь розділу; збудженням хімічних реакцій. Утворення ювенільних поверхонь, а також вихід на поверхню лінійних і точкових дефектів сприяють «холодному» зварюванню частинок між собою з формуванням композиційних частинок з шаруватою структурою. Зі збільшенням часу обробки частинки набувають однорідної структури та досягається баланс між процесами їх подрібнення і «холодного» зварювання, що призводить до стабілізації середнього розміру частинок [11, 12]. Слід зазначити також, що при проведенні процесу МЛ формуванню аморфної структури в частинках порошоків сприяє генерування в них в процесі МЛ дефектів кристалічної структури.

Метою роботи було одержання для газотермічного напilenня покриттів з аморфно-кристалічною структурою композиційних порошоків шляхом механічного легування суміші, що складається з аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB і добавки однієї з тугоплавких сполук (ZrB_2 , $(Ti, Cr)C$ і $FeTiO_3$).

Матеріали та методи досліджень. В якості аморфізуючого сплаву було обрано аналог ПГ-Н4 ($FeCrMoB$), який містить у своєму складі нікель в кількості близько 24 мас. %. В якості легуючих

фаз КП були обрані найбільш широко поширені представники керамічних тугоплавких сполук: борид цирконію ZrB_2 , подвійний карбід титану–хрому $(Ti, Cr)C$ (твердий розчин 24 об. % Cr_3C_2 в TiC) і оксид $FeTiO_3$ (ільменіт). Характеристика вихідних матеріалів представлена в табл. 1.

Розподіл часток за розмірами як вихідних порошоків, так і продуктів МЛ визначали як за допомогою аналізатора Mastersizer 2000 фірми «Malvern Panalytical» (Великобританія), так і ситовим аналізом згідно ДСТУ 2640-94.

Отримання КП проводили в планетарно-му млині «Активатор 2SL» при швидкості обертання центральної осі 1000 об/хв, барабанів 1500 об/хв. Корпуси барабанів і кулі виготовлені зі сталі ШХ15. З метою усунення приварювання в процесі обробки матеріалів суміші до стінок барабанів і розмельних тіл в суміш додавали поверхнево-активну речовину (ПАР) – олеїнову кислоту $(CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7COOH)$ в кількості 0,5 мас. %. Процес проводили на повітрі з відбором проміжних проб через кожні 0,5 год обробки.

Мікродюретричний аналіз вихідних частинок і отриманих продуктів проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 25 г з наступною побудовою варіаційних кривих значень мікротвердості за результатами 30 вимірювань [13].

Хімічний аналіз отриманих КП досліджували на скануючому електронному мікроскопі JSM-6390LV (JEOL, Японія) з приставкою енергодисперсійного (ЕДС) аналізу INCA ENERGY (Oxford Instruments, Великобританія), в режимі вторинних електронів в низькому (10^{-4} Па) вакуумі, з прискорюючою напругою 20 кВ.

Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) проводили на установці «ДРОН-УМ-1», випромінювання CuK_{α} , монохроматизоване.

Термодинамічна оцінка реакцій при взаємодії аморфізуючого сплаву з тугоплавкими сполуками та вибір складу композиційних порошоків. З метою визначення ймовірності проходження реакцій при нагріванні до 1500 К між елементами металевої матриці (Fe, Mo, Ni, Cr та B) і включеннями тугоплавких сполук (ZrB_2 , $(Ti, Cr)C$ і $FeTiO_3$) проводили термодинамічні розрахунки. У зв'яз-

Таблиця 1. Характеристика вихідних порошоків

Матеріал	Хімічний склад, мас. %	Спосіб отримання	$T_{пл}$, К	γ , г/см ³	HV , ГПа
FeMoNiCrB	Fe – 36,2; Mo – 29,9; Ni – 23,6; Cr – 7,6; B – 2,7	Розпилення розплаву азотом	1523	7,84	6,2±1,2
ZrB_2	Zr – 79,5; B – 19,0	Вуглетермічний метод відновлення оксиду цирконію ТУ 6-09-03-46-75	3323	6,1	15,0±2,5
$(Ti, Cr)C$ (ПСТУХ)	Ti – 54; Cr – 25,5; $C_{общ}$ – 18,6; $C_{св}$ – 0,7	Самопоширюваний високотемпературний синтез ТУ № 88 УССР147.040-87	~3023	5,35	14,1±2,5
$FeTiO_3$	Fe – 36,8; O – 31,6; Ti – 31,6	Дроблення і подрібнювання руди ільменіту	1638	4,72	6,1±0,98

ку з відсутністю літературних даних по теплоті утворення та ентропії подвійного карбіду титану–хрому (Ti,Cr)C для розрахунків використовували термодинамічні дані для карбідів Cr_3C_2 і TiC. Результати термодинамічних розрахунків представлені на рис. 1–3.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки.

1. Взаємодія Fe, Cr і Ni з ZrB_2 до 1500 °С термодинамічно неможлива, лише в результаті взає-

модії ZrB_2 з Mo утворюється Mo_2B при температурі понад 1000 °С.

2. Термодинамічні розрахунки для TiC і Cr_3C_2 показують, що в результаті взаємодії з бором утворюються бориди титану TiB_2 і хрому CrB_2 , відповідно. Крім того, в системі $\text{Mo}+\text{Cr}_3\text{C}_2$ можлива реакція з утворенням карбіду молібдену Mo_2C , а в системі $\text{Ni}+\text{Cr}_3\text{C}_2$ – карбіду нікелю (Ni_3C).

3. Термодинамічні розрахунки для системи $\text{Me}+\text{FeTiO}_3$ показують, що в даній системі можливе утворення оксидів – TiO_2 , Cr_2O_3 і B_2O_3 .

Результати експериментальних досліджень.

При виборі складу суміші порошків для отримання композиційних частинок в даній роботі керувалися рекомендаціями по виробництву зносостійких композиційних матеріалів методами порошкової металургії, згідно з якими вміст дисперсних включень становить 20...30 об. % [14].

На рис. 4 представлено зовнішній вигляд і мікроструктура частинок вихідних порошків, а на рис. 5 їх розподіл за розміром. Як видно, частинки порошку FeMoNiCrB мають сферичну форму, що характерно для порошків, отриманих методом розпилення розплаву азотом. Порошки керамічних сполук мають характерну для твердих і крихких матеріалів кутову форму. Середній розмір частинок сплаву FeMoNiCrB становить ~110 мкм, тугоплавких сполук ZrB_2 і (Ti, Cr) C складає 65 і 55 мкм, відповідно. Розмір 96 %-ів частинок FeTiO_3 відноситься до діапазону 40...100 мкм.

Методом РСФА вихідних порошків було встановлено, що порошок FeMoNiCrB-сплаву має багатофазну кристалічну структуру з незначним ступенем аморфізації в області твердого розчину на

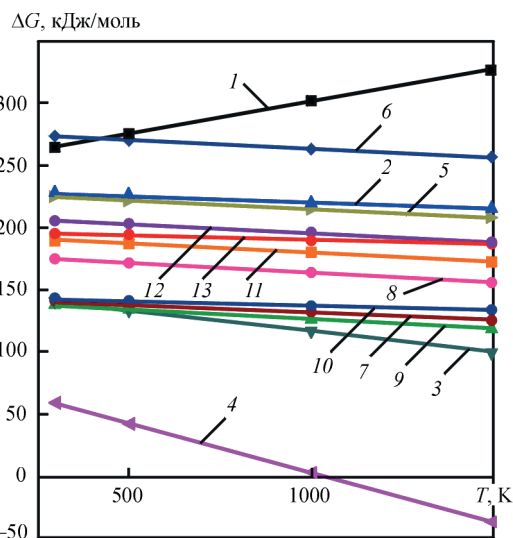


Рис. 1. Температурна залежність зміни енергії Гіббса реакції $\text{Me}+\text{ZrB}_2$, де Me – Fe, Mo, Ni, Cr, B: 1 – $2\text{Fe}+\text{ZrB}_2=2\text{FeB}+\text{Zr}$; 2 – $\text{Mo}+\text{ZrB}_2=\text{MoB}_2+\text{Zr}$; 3 – $2\text{Mo}+\text{ZrB}_2=2\text{MoB}+\text{Zr}$; 4 – $4\text{Mo}+\text{ZrB}_2=2\text{Mo}_2\text{B}+\text{Zr}$; 5 – $\text{Ni}+\text{ZrB}_2=\text{NiZr}+2\text{B}$; 6 – $1/2\text{Ni}+\text{ZrB}_2=1/2\text{NiZr}_2+2\text{B}$; 7 – $7/2\text{Ni}+\text{ZrB}_2=1/2\text{Ni}_7\text{Zr}_2+2\text{B}$; 8 – $5\text{Ni}+\text{ZrB}_2=\text{Ni}_5\text{Zr}+2\text{B}$; 9 – $3\text{Ni}+\text{ZrB}_2=1\text{Ni}_3\text{Zr}+2\text{B}$; 10 – $23/8\text{Ni}+\text{ZrB}_2=1/8\text{Ni}_{23}\text{Zr}_8+2\text{B}$; 11 – $10/7\text{Ni}+\text{ZrB}_2=1/7\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7+2\text{B}$; 12 – $11/9\text{Ni}+\text{ZrB}_2=1/9\text{Ni}_{11}\text{Zr}_9+2\text{B}$; 13 – $\text{Cr}+\text{ZrB}_2=\text{CrB}_2+\text{Zr}$

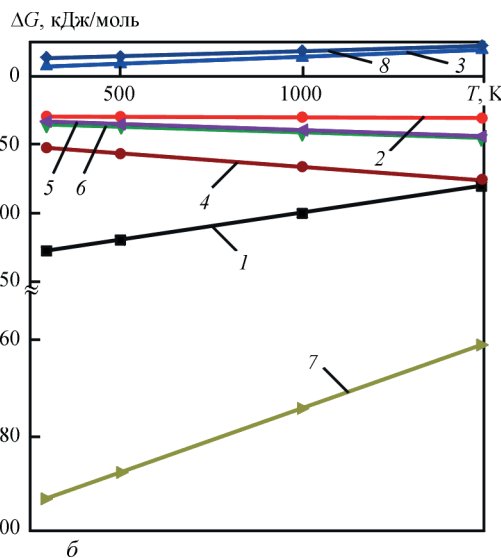
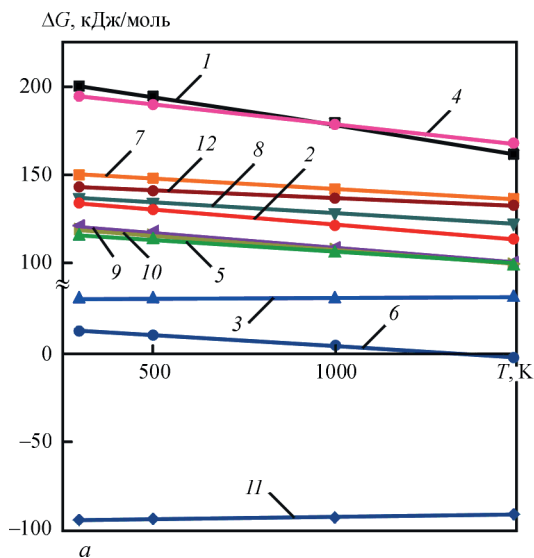


Рис. 2. Температурна залежність зміни енергії Гіббса реакції: а – $\text{Me}+\text{TiC}$; б – $\text{Me}+\text{Cr}_3\text{C}_2$, де Me – Fe, Mo, Ni, Cr, B; для а: 1 – $3\text{Fe}+\text{TiC}=\text{Fe}_3\text{C}+\text{Ti}$; 2 – $2\text{Mo}+\text{TiC}=\text{Mo}_2\text{C}+\text{Ti}$; 3 – $3/2\text{Mo}+\text{TiC}=1/2\text{Mo}_3\text{C}_2+\text{Ti}$; 4 – $3\text{Ni}+\text{TiC}=\text{Ni}_3\text{C}+\text{Ti}$; 5 – $\text{Ni}+\text{TiC}=\text{NiTi}+\text{C}$; 6 – $3\text{Ni}+\text{TiC}=\text{Ni}_3\text{Ti}+\text{C}$; 7 – $1/2\text{Ni}+\text{TiC}=1/2\text{NiTi}_2+\text{C}$; 8 – $3/2\text{Cr}+\text{TiC}=1/2\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{Ti}$; 9 – $7/3\text{Cr}+\text{TiC}=1/3\text{Cr}_7\text{C}_3+\text{Ti}$; 10 – $23/6\text{Cr}+\text{TiC}=1/6\text{Cr}_{23}\text{C}_6+\text{Ti}$; 11 – $2\text{B}+\text{TiC}=\text{TiB}_2+\text{C}$; 12 – $4\text{B}+\text{TiC}=\text{B}_4\text{C}+\text{Ti}$; для б: 1 – $6\text{Fe}+\text{Cr}_3\text{C}_2=2\text{Fe}_3\text{C}+3\text{Cr}$; 2 – $3\text{Mo}+\text{Cr}_3\text{C}_2=\text{Mo}_3\text{C}_2+3\text{Cr}$; 3 – $4\text{Mo}+\text{Cr}_3\text{C}_2=2\text{Mo}_2\text{C}+3\text{Cr}$; 4 – $6\text{Ni}+\text{Cr}_3\text{C}_2=2\text{Ni}_3\text{C}+3\text{Cr}$; 5 – $14/3\text{Cr}+\text{Cr}_3\text{C}_2=1/3\text{Cr}_{23}\text{C}_6$; 6 – $5/3\text{Cr}+\text{Cr}_3\text{C}_2=2/3\text{Cr}_7\text{C}_3$; 7 – $6\text{B}+\text{Cr}_3\text{C}_2=3\text{CrB}_2+2\text{C}$; 8 – $8\text{B}+\text{Cr}_3\text{C}_2=2\text{B}_4\text{C}+3\text{Cr}$

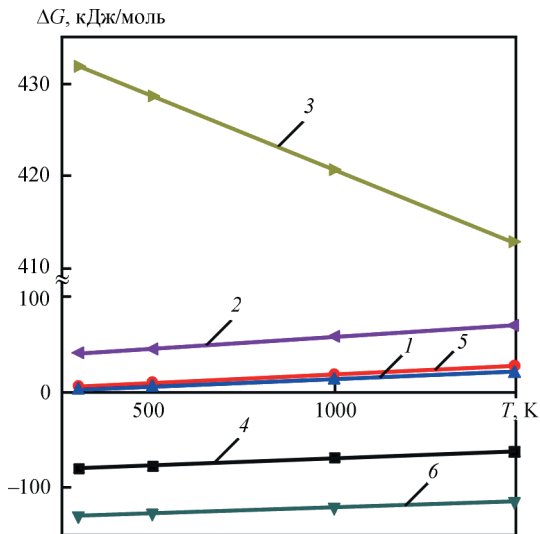


Рис. 3. Температурна залежність зміни енергії Гіббса реакції $\text{Me}+\text{FeTiO}_3$, де $\text{Me} - \text{Fe, Mo, Ni, Cr, V}$: 1 – $1/2\text{Mo}+\text{FeTiO}_3 = \text{Fe}+1/2\text{MoO}_2+\text{TiO}_2$; 2 – $\text{Ni}+\text{FeTiO}_3 = \text{NiTiO}_3+\text{Fe}$; 3 – $3/4\text{Ni}+\text{FeTiO}_3 = 3/4\text{NiFe}_2\text{O}_4+1/2\text{Fe}+\text{Ti}$; 4 – $2/3\text{Cr}+\text{FeTiO}_3 = \text{Fe}+1/3\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$; 5 – $1/2\text{Cr}+\text{FeTiO}_3 = \text{Fe}+1/2\text{CrO}_2+\text{TiO}_2$; 6 – $2/3\text{V}+\text{FeTiO}_3 = \text{Fe}+1/3\text{V}_2\text{O}_5+\text{TiO}_2$

основі заліза (рис. 6, а). Порошок ZrB_2 домішок не містить (рис. 6, б), в порошку $(\text{Ti,Cr})\text{C}$ в незначній

кількості виявлено TiO (рис. 6, в), а в FeTiO_3 можлива наявність Fe_2O_3 (рис. 6, з).

Дослідження структури та розміру частинок порошків в процесі формування КП показало (рис. 7), що на початкових етапах обробки процеси подрібнення превалюють над процесами холодного зварювання, в результаті чого через 0,5 год обробки розмір основної маси частинок зменшується в порівнянні з вихідним до <40 мкм, а середній розмір частинок складає 16...17 мкм. Подальша обробка сумішей порошків веде до збільшення маси частинок з розміром <40 мкм (рис. 7, з, м). При цьому середній розмір частинок збільшується до 20...22 мкм (рис. 7, в, жс), що свідчить про холодне зварювання частинок вихідних порошків між собою з утворенням агломератів.

Дослідження розподілу за розмірами частинок композиційних порошків з включеннями тугоплавких сполук в залежності від часу їх обробки (рис. 8) показало, що на початкових етапах в результаті подрібнення частинок порошків суміші набувають бімодального розподілу з двома найбільш ймовірними модами – 4...5 і 23...26 мкм (рис. 8, а). Такий розкид може бути пов'язаний з інтенсивним подрібненням частинок з більш високим показником

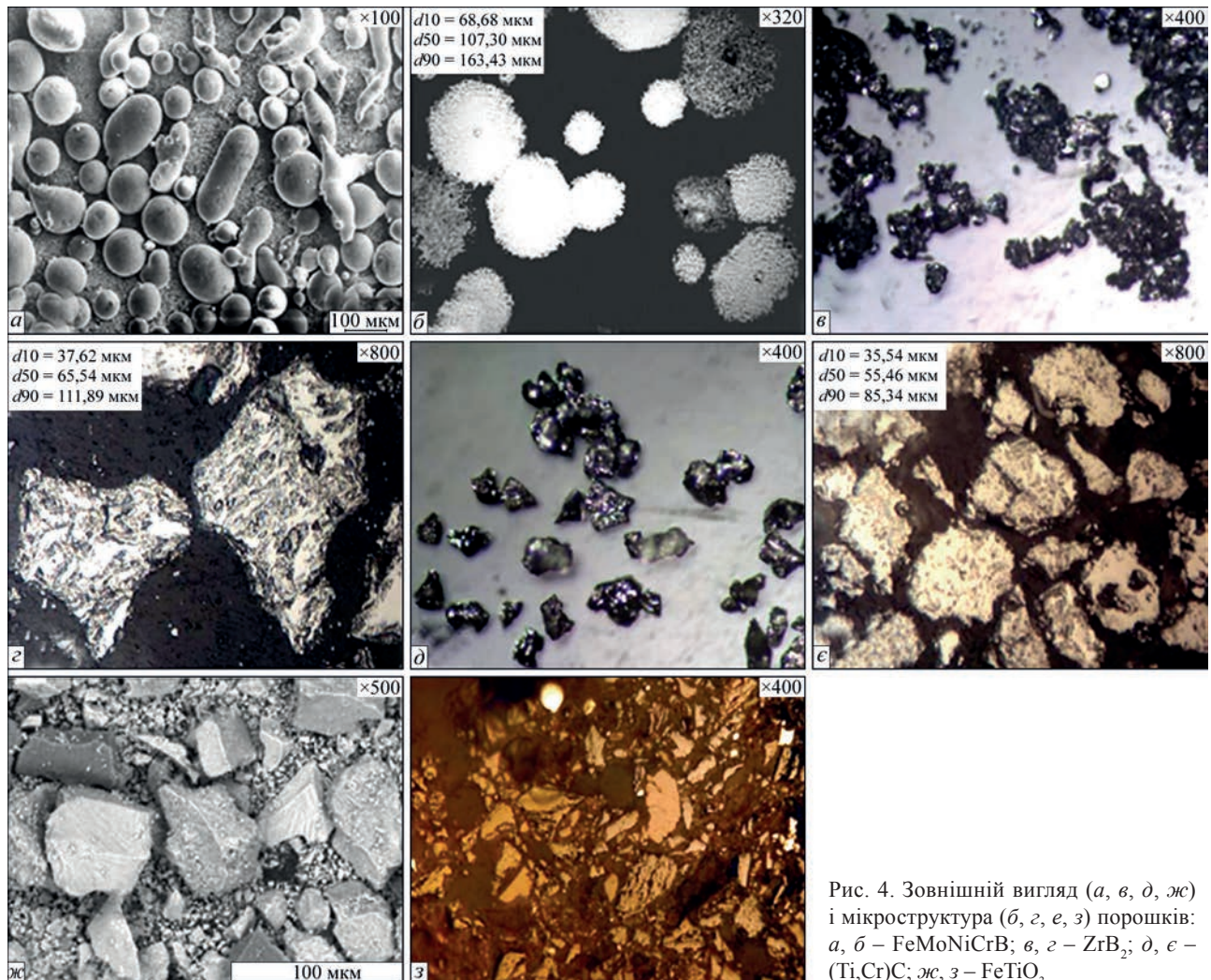


Рис. 4. Зовнішній вигляд (а, в, д, ж) і мікроструктура (б, з, е, з) порошків: а, б – FeMoNiCrB ; в, з – ZrB_2 ; д, е – $(\text{Ti,Cr})\text{C}$; ж, з – FeTiO_3

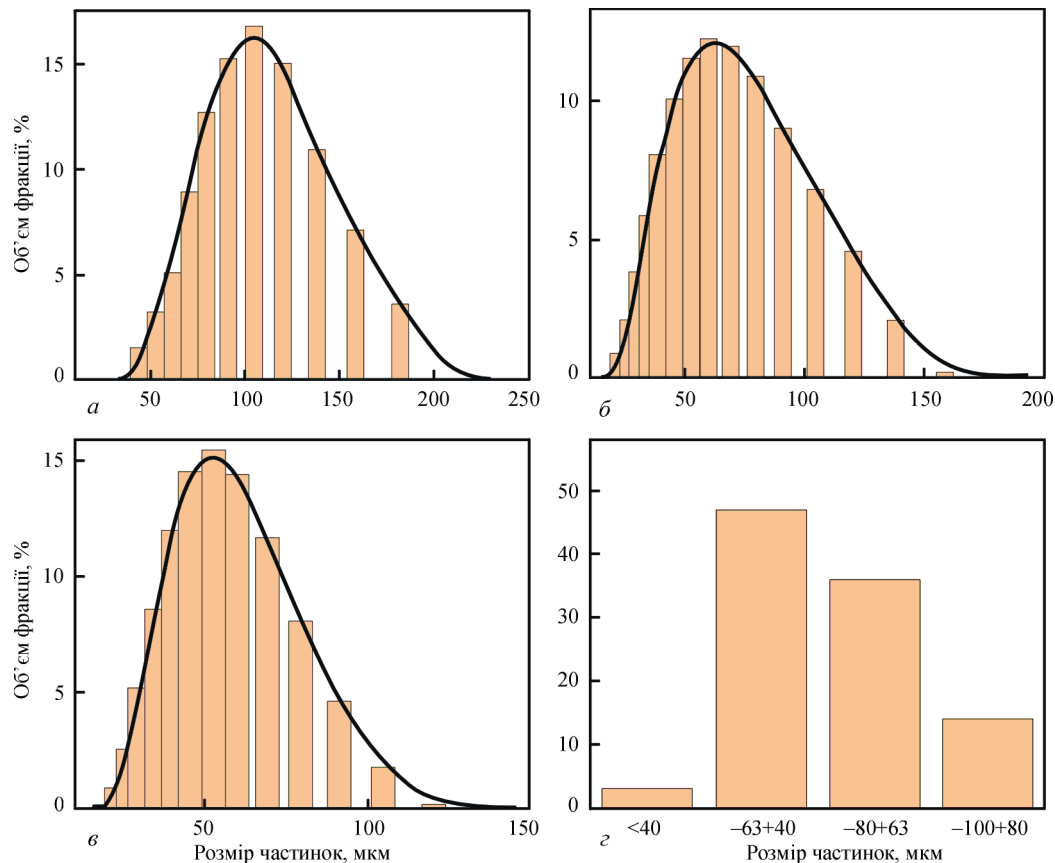


Рис. 5. Розподіл часток вихідних порошків за розміром: *a* – FeMoNiCrB; *б* – ZrB₂; *в* – (Ti,Cr)C; *г* – FeTiO₃ (*a*, *б*, *в* – аналізатор Mastersizer 2000; *г* – ситовий аналіз)

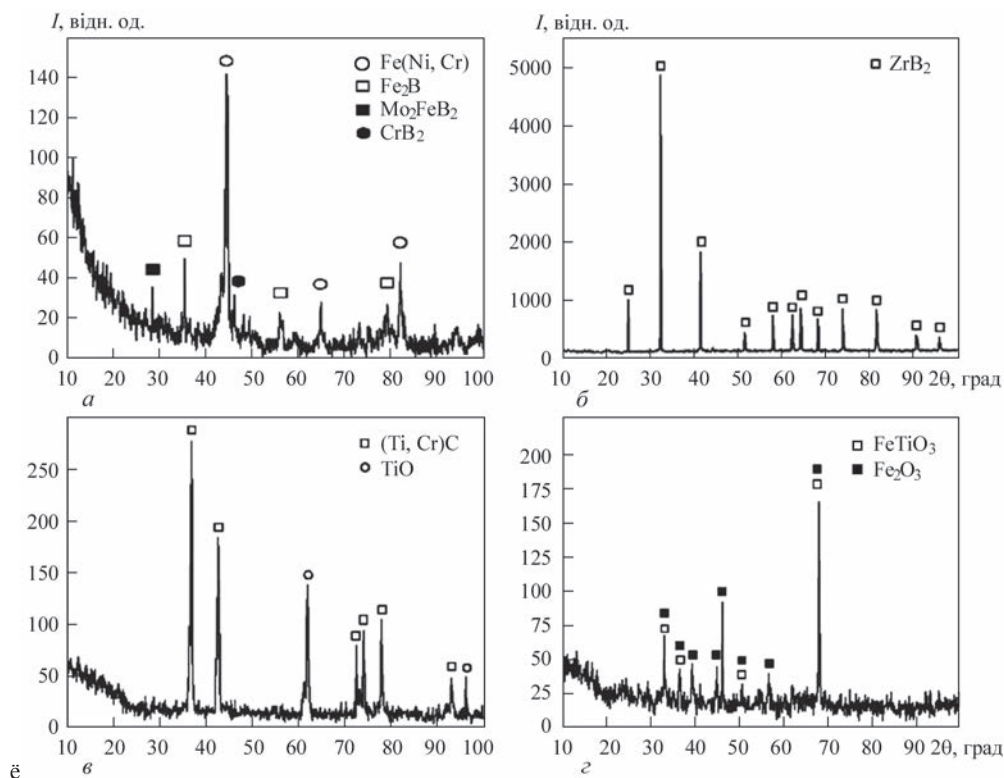


Рис. 6. Рентгенограми вихідних порошків: *a* – FeMoNiCrB; *б* – ZrB₂; *в* – (Ti,Cr)C; *г* – FeTiO₃

крихкості. З початком утворення агломератів (через 1,0 год обробки) розподіл частинок за розміром набуває мономодального характеру.

Однією з характеристик порошкових матеріалів є питома поверхня частинок. Оцінка зміни питомої поверхні частинок на різних етапах обробки порошку

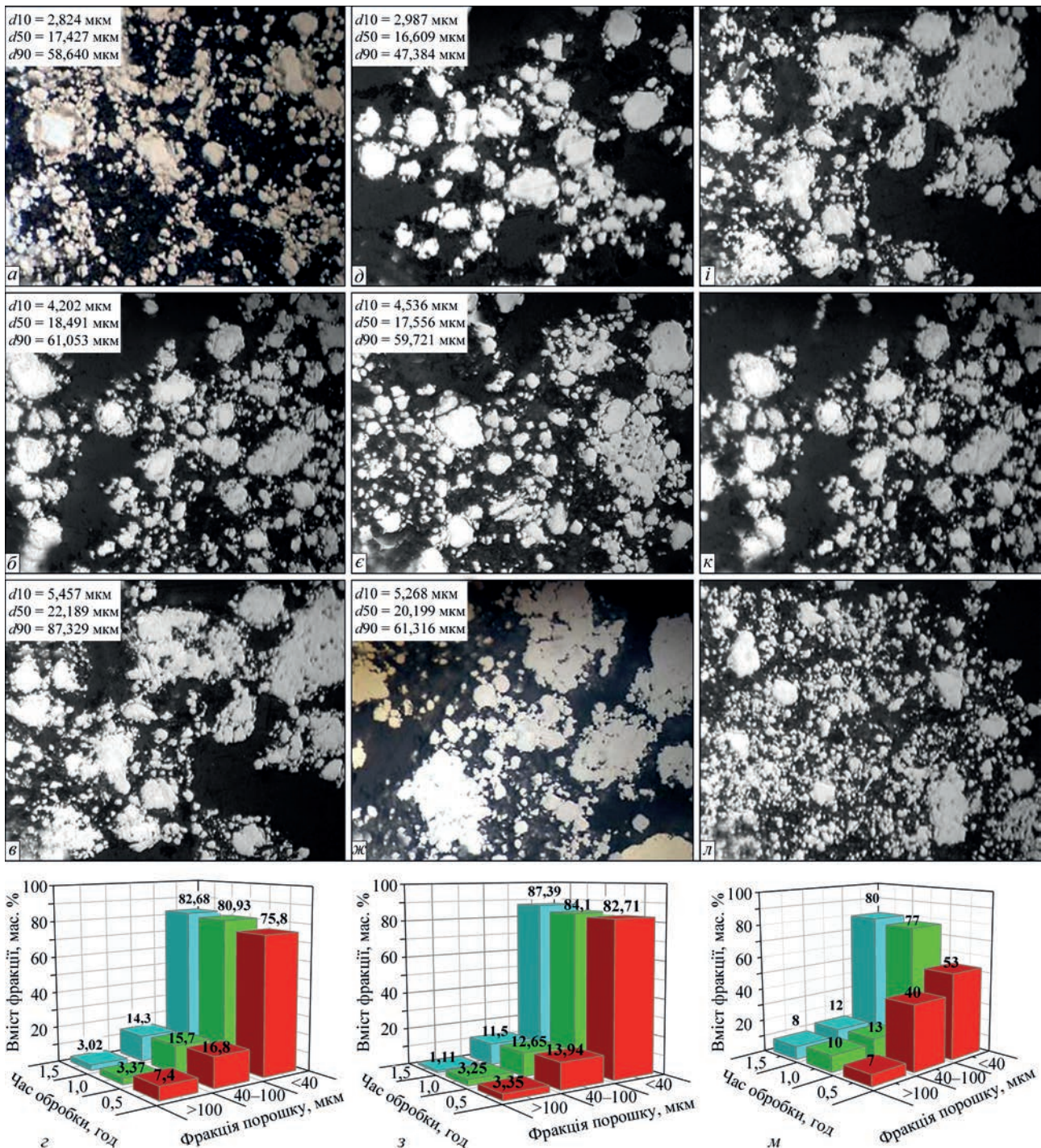


Рис. 7. Мікроструктура ($\times 800$) (а, б, в, д, е, ж, з, и, к, л) та гістограми розподілу за розмірами частинок порошків (з, з, м) при різній тривалості процесу МЛ сумішей: а, б, в, з – $\text{FeMoNiCrB} + \text{ZrB}_2$; д, е, ж, з – $\text{FeMoNiCrB} + (\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$; и, к, л, м – $\text{FeMoNiCrB} + \text{FeTiO}_3$

(рис. 9) показала, що на початкових стадіях обробки, коли переважають процеси подрібнення, відбувається збільшення питомої поверхні частинок з досягненням максимального значення через 0,5 год. З початком утворення агломератів спостерігається зниження питомої поверхні частинок, яке відбувається до тих пір, поки не настає рівновага між процесами подрібнення та холодного зварювання частинок між собою, про що свідчить практично відсутність зміни питомої поверхні продуктів обробки.

Після обробки порошкових сумішей у планетарному млині протягом 1,5 год частинки всіх складів набувають округлої форми (рис. 10), при цьому, як показує ЕДС-аналіз, кожна з них містить всі елементи вихідних компонентів: металу (Fe, Mo, Ni, Cr) та тугоплавких сполук (Ti, Zr), тобто є частинкою КП (табл. 2). Наявність кисню в сумішах з ZrB_2 і $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$ свідчить про окислення при МЛ, оскільки процес проводили на повітрі.

Таким чином, обробка суміші порошків протягом 1,5 год є цілком достатньою для отримання компози-

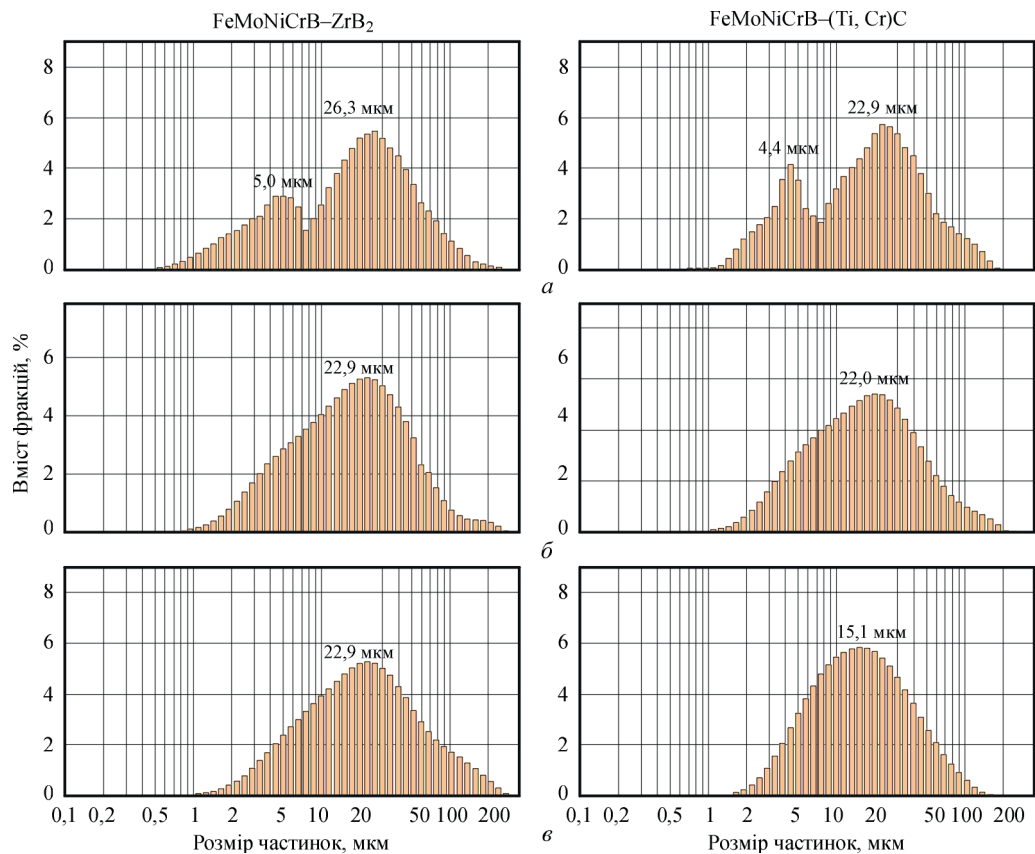


Рис. 8. Розподіл частинок за розмірами в залежності від часу обробки суміші: а – 0,5; б – 1,0; в – 1,5 год

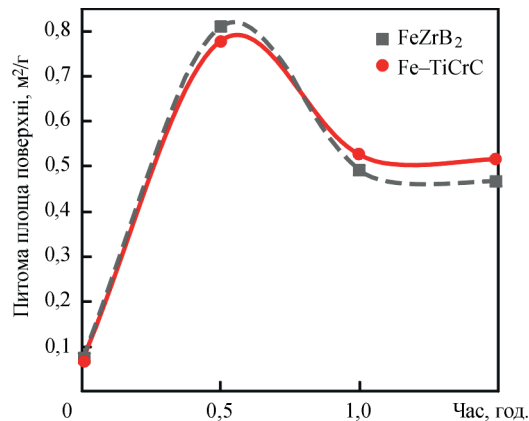


Рис. 9. Зміна питомої площі поверхні частинок КП в залежності від часу їх обробки

ційних частинок з рівномірним розподілом компонентів. Подальше збільшення часу обробки не має сенсу, тим більше, що воно призведе лише до додаткового

Таблиця 2. Усереднені значення хімічного складу частинок після обробки суміші порошків протягом 1,5 год

FeMoNiCrB-ZrB ₂					
Fe	Mo	Ni	Cr	Zr	O
24,18± ±0,13	22,82± ±0,26	22,95± ±0,11	5,55± ±0,19	17,47± ±0,19	7,03± ±0,09
FeMoNiCrB-(Ti,Cr)C					
Fe	Mo	Ni	Cr	Ti	O
23,02± ±0,10	23,23± ±0,31	23,79± ±0,12	11,52± ±0,93	10,66± ±0,2	7,78± ±0,13
FeMoNiCrB-FeTiO ₃					
Fe	Mo	Ni	Cr	Ti	O
30,98± ±0,52	23,85± ±0,24	21,23± ±0,16	7,05± ±0,51	4,18± ±0,37	12,71± ±0,78

окислення порошку та забруднення його продуктами руйнування стінок барабанів і розмельних тіл.

За характером варіаційних кривих мікротвердості частинок порошків на різних етапах ме-

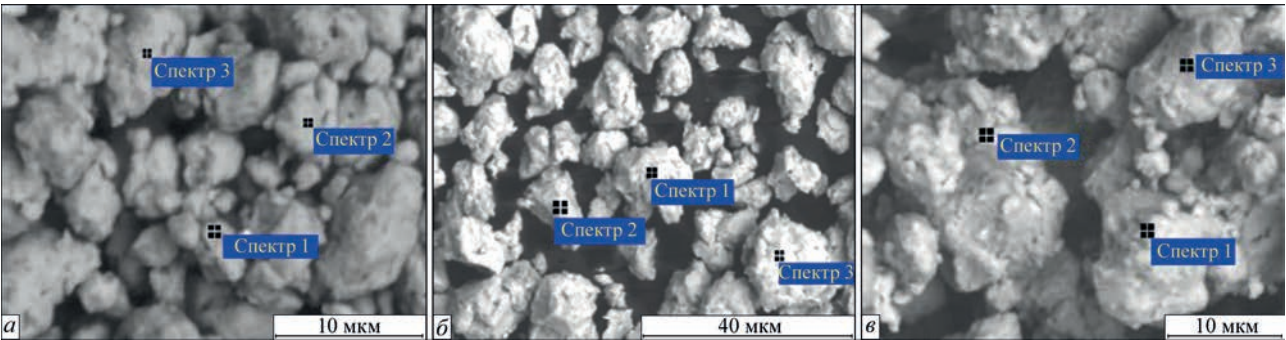


Рис. 10. Зовнішній вигляд частинок після обробки сумішей порошків у планетарному млині протягом 1,5 год: а – FeMoNiCrB+ZrB₂; б – FeMoNiCrB+(Ti,Cr)C; в – FeMoNiCrB+FeTiO₃

ханічного легування (рис. 11) можна відзначити присутність на графіках через 30 хв обробки двох піків значень мікротвердості (рис. 11, а).

Збільшення тривалості процесу до 1,0 год, в результаті якого відбувається формування агломератів, що складаються з вихідних керамічних і металевих частинок, веде до того, що на варіаційних кривих відзначається присутність тільки одного найбільш ймовірного значення мікротвердості (рис. 11, б, в). Через 1,5 год обробки середня мікротвердість становить $HV=6,2\pm1,6$ ГПа для складу FeMoNiCrB-ZrB_2 , $HV=5,5\pm1,1$ ГПа для складу $\text{FeMoNiCrB-(Ti,Cr)C}$ та $5,1\pm0,7$ ГПа для FeMoNiCrB-FeTiO_3 .

Методом РСФА частинок композиційних порошків, отриманих після 1,5 год МЛ (рис. 12), було встановлено, що всі вони придбали аморфно-кристалічну структуру. Розширення ліній рентгенівських відображень свідчить про подрібнення частинок до нанорозмірів. Оцінки областей когерентного розсіювання показали, що розмір ОКР для ZrB_2 зменшився з 128 до 23 нм, для $(\text{Ti,Cr})\text{C}$ – з 56 до 17 нм, а для сплаву FeMoNiCrB з 48 до 12 нм. Що стосується аморфізації FeMoNiCrB -сплаву в процесі МЛ, то про це свідчить утворення на рентенограмах «гало» в діапазонах кутів $2\theta = 33,9\dots52,8^\circ$ і $68,2\dots84,3^\circ$.

Утворення нових фаз в процесі МЛ в результаті взаємодії між елементами FeMoNiCrB -сплаву

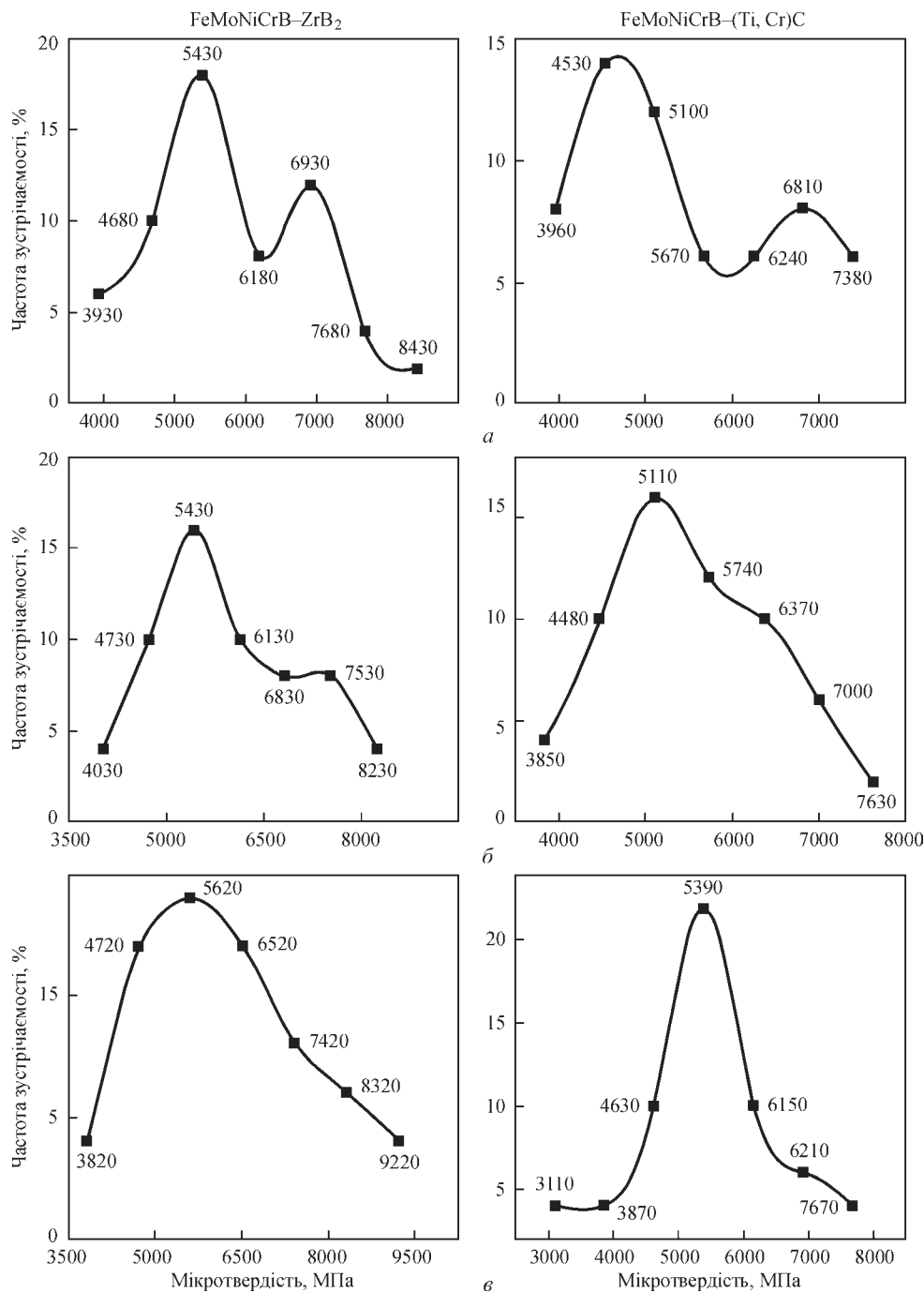


Рис. 11. Варіаційні криві мікротвердості частинок після обробки сумішей протягом: а – 0,5; б – 1,0; в – 1,5 год

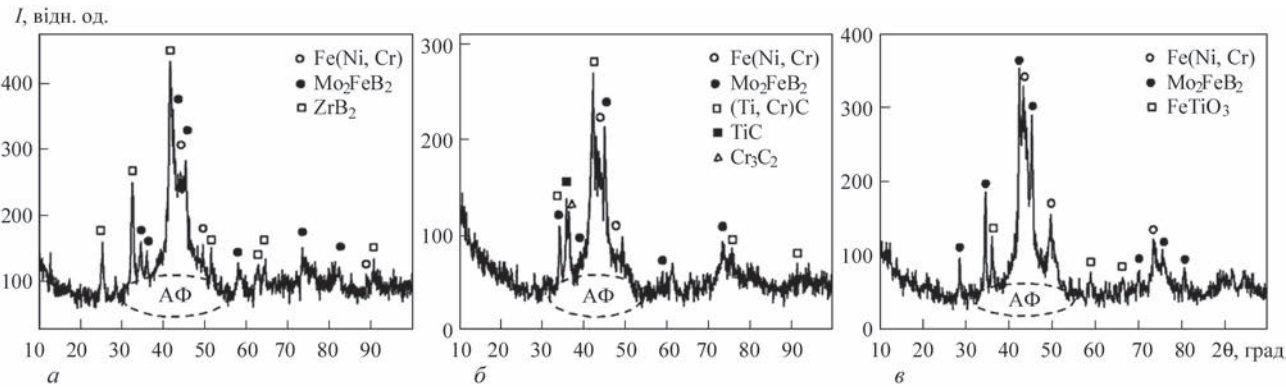


Рис. 12. Рентгенограми порошків: а – FeMoNiCrB-ZrB₂; б – FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C; в – FeMoNiCrB-FeTiO₃

Таблиця 3. Характеристика продуктів МЛ, отриманих протягом 1,5 год

Склад	Фазовий склад	Розмір частинок, мкм	HV, ГПа
FeMoNiCrB-ZrB ₂	Тв. р-р Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , ZrB ₂ , аморфна фаза	5...87	6,2±1,6
FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C	Тв. р-р Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , (Ti,Cr)C, TiC, Cr ₃ C ₂ , аморфна фаза	5...61	5,5±1,1
FeMoNiCrB-FeTiO ₃	Тв. р-р Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , FeTiO ₃ , аморфна фаза	<40	5,1±0,7

і тугоплавких сполук не виявлено. Можна лише відзначити злиття основних піків рентгенівських відображень для твердих розчинів Ni, Cr і Fe в один, що може свідчити про утворення пересиченого твердого розчину на основі заліза. Крім того, спостерігається розщеплення дифракційного піку під кутом $2\theta = 36,8^\circ$, який відповідає подвійному карбиду титану-хрому (Ti,Cr)C, на два, які відповідають фазам TiC і Cr₃C₂, що свідчить про розпад подвійного карбиду титану-хрому.

Результати по фазовому складу та мікротвердості продуктів МЛ через 1,5 год обробки представлені в табл. 3.

Отримані в процесі МЛ аморфно-нанокристалічні керметні порошки, що складаються з аморфізуючої матриці на Fe-основі з впровадженими в її об'єм тугоплавкими сполуками, можуть бути використані в технології газотермічного напилення композиційних покриттів з аморфною структурою. Однак малий розмір частинок (15...22 мкм) і високе значення питомої поверхні (~ 0,5 м²/г), за рахунок чого в порошках відсутня плинність, ускладнює їх рівномірну подачу в струмінь при ГТН. З метою збільшення розміру частинок продуктів МЛ і збільшення їх плинності проводиться конгломерування продуктів МЛ 5%-им розчином полівінілового спирту у воді з наступним сушінням суміші при температурі 80 °С, подрібненням отриманих конгломератів і відсівом частинок з розміром 40...63 мкм.

Висновки

1. Досліджено фізико-хімічні процеси, що відбуваються при формуванні композиційних порошків на основі FeMoNiCrB в умовах механічного легування з введенням легуючих добавок ZrB₂, (Ti,Cr)C і FeTiO₃.

2. Встановлено, що в результаті механічного легування формуються аморфно-нанокристалічні керметні порошки, що складаються з пересиченого твердого розчину Fe(Ni,Cr) і добавок тугоплавких сполук (ZrB₂, (Ti,Cr)C або FeTiO₃) і величинами середнього значення мікротвердості керметів FeMoNiCrB-ZrB₂ – 6,2±1,6 ГПа, FeMoNiCrB-(Ti,Cr)C – 5,5±1,1 ГПа та FeMoNiCrB-FeTiO₃ – 5,1±0,7 ГПа.

3. Встановлено, що стабілізація розміру конгломератних частинок в процесі МЛ суміші порошків FeMoNiCrB+ZrB₂, FeMoNiCrB+(Ti,Cr)C і FeMoNiCrB+FeTiO₃ відбувається через 1,5 год обробки і середній розмір становить: для FeMoNiCrB-ZrB₂ – 23 мкм, для FeMoNiCrB-(Ti,Cr)C – 15 мкм, для FeMoNiCrB-FeTiO₃ – 25 мкм.

4. З метою використання отриманих продуктів МЛ для газотермічного напилення композиційних покриттів з аморфізованою структурою виготовлені порошки з конгломератною структурою і розміром частинок 40...63 мкм.

Список літератури

1. Судзуки К., Худзимори Х., Хасимото К. (1987) *Аморфные металлы*. Пер. с япон. Поляк Я.И., Кекало Б.И. (ред.). Москва, Металлургия.

2. Куницкий Ю.А., Коржик В.Н., Борисов Ю.С. (1998) *Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике*. Киев, Техніка.

3. Калита В.И., Комлев Д.И. (2008) *Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой*. Москва, Лидер М.

4. Yongjiang, H., Yuanzhi, G., Hongbo, F., Jun, S. (2012) Synthesis of Fe–Cr–Mo–C–B amorphous coating with high corrosion resistance. *Materials Letters*, 89, 229–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.08.114>.

5. Terajima, T., Takeuchi, F., Nakata, K. et al. (2010) Composite coating containing WC/12Co cermet and Fe-based metallic glass deposited by high-velocity oxygen fuel spraying. *Journal of Alloys and Compounds*, 504, 1, 288–291. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.209>

6. Yugeswaran, S., Kobayashi, A., Suresh, K., Subramanian, B. (2013) Characterization of gas tunnel type plasma sprayed TiN reinforced Fe-based metallic glass coatings. *Ibid.*, 551, 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.09.111>
7. Movahedi, B. (2018) Mechanical investigation approach to optimize the high-velocity oxygen fuel Fe-based amorphous coatings reinforced by B₄C nanoparticles. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 12, 9, 460–465. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1474539>
8. Коржик В.Н., Борисова А.Л., Попов В.В. и др. (2014) Керметные покрытия системы «карбид хрома–нихром», полученные методом сверхзвукового воздушно-газового плазменного напыления. *Автоматическая сварка*, 12, 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.12.05>
9. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Астахов Е.А. и др. (2017) Детонационные покрытия из порошков интерметаллидов системы Fe–Al, полученных методом механохимического синтеза. *Там же*, 4, 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.04.05>
10. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. (1986) *Плазменные порошковые покрытия*. Киев, Техніка.
11. Витязь П.А., Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф. (1998) *Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди*. Минск, Беларуская наука.
12. Григорьева Т.Ф., Баранова А.П., Ляхов Н.З. (2008) *Механохимический синтез в металлических системах*. Аввакумов Е.Г. (ред.). Новосибирск, Параллель.
13. Лебедева С.И. (1977) *Микротвердость минералов*. Юшко С.А. (ред.). Москва, Недра.
14. Surzhenkov, A., Antonov, M., Goljandin, D. et al. (2013) Sliding wear of TiC–NiMo and Cr₃C₂–Ni cermet particles reinforced FeCrSiB matrix HVOF sprayed coatings. *Estonian Journal of Engineering*, 19, 3, 203–211. DOI: <https://doi.org/10.3176/eng.2013.3.03>
5. Kalita, V.I., Komlev, D.I. (2008) *Plasma coatings with nano-crystalline and amorphous structure*. Moscow, Lider M [in Russian].
4. Yongjiang, H., Yuanzhi, G., Hongbo, F., Jun, S. (2012) Synthesis of Fe–Cr–Mo–C–B amorphous coating with high corrosion resistance. *Materials Letters*, 89, 229–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.08.114>
5. Terajima, T., Takeuchi, F., Nakata, K. et al. (2010) Composite coating containing WC/12Co cermet and Fe-based metallic glass deposited by high-velocity oxygen fuel spraying. *J. of Alloys and Compounds*, 504(1), 288–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.209>
6. Yugeswaran, S., Kobayashi, A., Suresh, K., Subramanian, B. (2013) Characterization of gas tunnel type plasma sprayed TiN reinforced Fe-based metallic glass coatings. *Ibid.*, 551, 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.09.111>
7. Movahedi, B. (2018) Mechanical investigation approach to optimize the high-velocity oxygen fuel Fe-based amorphous coatings reinforced by B₄C nanoparticles. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 12(9), 460–465. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1474539>
8. Korzhik, V.N., Borisova, A.L., Popov, V.V. et al. (2014) Cermet coatings of chromium carbide-nichrome system produced by supersonic plasma gas air spraying. *The Paton Welding J.*, 12, 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.12.05>
9. 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. *Ibid.*, 4, 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.04.05>
10. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L. (1986) *Plasma powder coatings*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
11. Vityaz, P.A., Lovshenko, F.G., Lovshenko, G.F. (1998) *Mechanically-doped alloys based on aluminium and copper*. Minsk, Belarusskaya Nauka [in Russian].
12. Grigorieva, T.F., Baranova, A.P., Lyakhov, N.Z. (2008) *Mechanochemical synthesis in metallic systems*. Ed. by E.G. Avvakumov. Novosibirsk, Parallel [in Russian].
13. Lebedeva, S.I. (1977) *Microhardness of minerals*. Ed. by S.A. Yushko. Moscow, Nedra [in Russian].
14. Surzhenkov, A., Antonov, M., Goljandin, D. et al. (2013) Sliding wear of TiC–NiMo and Cr₃C₂–Ni cermet particles reinforced FeCrSiB matrix HVOF sprayed coatings. *Estonian J. of Engineering*, 19(3), 203–211. DOI: <https://doi.org/10.3176/eng.2013.3.03>

References

1. Suzuki, K., Fujimori, H., Hasimoto, K. (1987) *Amorphous metals*. Ed. by Ya.I. Polyak, B.I. Kekalo. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Kunitsky, Yu.A., Korzhik, Yu.S. (1988) *Noncrystalline metal materials and coatings in engineering*. Kiev, Tekhnika [in Russian].

COMPOSITE POWDERS BASED ON FeMoNiCrB AMORPHIZING ALLOY WITH ADDITIVES OF REFRACTORY COMPOUNDS FOR THERMAL SPRAYING OF COATINGS

Yu.S. Borisov¹, A.L. Borisova¹, O.M. Burlachenko¹, T.V. Tsymbalista¹, M.A. Vasylykivska², Ye.G. Byba³

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

²I.M. Frantsevich Institute for Materials Science Problems of NASU. 3 Krzhizhanovskiy Str., 03142, Kyiv

³E.O. Paton Institute of Materials Science and Welding of NTUU «Igor Sikorskii Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohi Prosp., 03056, Kyiv

The process of producing by mechanical alloying method the composite powders, based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with additives of refractory compounds (ZrB₂, (Ti,Cr)C i FeTiO₃) by processing a mixture of component powders in planetary mill «Activator 2SL» was studied. It was found that after 1.5 h of processing its products are homogeneous conglomerates with average particle size, depending on the composition of composite powders, which was 23 ~m in the case of FeMoNiCrB+ZrB₂, 15 ~m in the case of FeMoNiCrB+(Ti,Cr)C, and 25 ~m in the case of FeMoNiCrB+FeTiO₃. XRF results reveal formation of an amorphous-nanocrystalline structure in the produced powders, which consists of Fe(Ni,Cr), Mo₂FeB₂ solid solution and disperse phase of additives of refractory compounds (ZrB₂, (Ti,Cr)C i FeTiO₃) with indications of certain interphase interaction of FeMoNiCrB and (Ti,Cr)C. Here, the amorphous phase appears as a result of the process of mechanical alloying. The values of measured microhardness in composite powders were as follows: FeMoNiCrB+ZrB₂ – 6.2±1.6 MPa, FeMoNiCrB+(Ti,Cr)C – 5.5±1.1 MPa, FeMoNiCrB-FeTiO₃ – 5.1±0.7 MPa. For application in thermal spraying of coatings with an amorphous structure, the composite powders produced from mechanical alloying products are used to form conglomerate powders with particle size and degree of flowability, meeting the requirements of thermally-sprayed coating technology (plasma, detonation, high-speed gas-flame). 14 Ref., 3 Tabl., 12 Fig.

Keywords: amorphizing alloy, refractory compounds, composite powder, mechanical alloying, structure, phase composition, granulometric composition

Надійшла до редакції 5.08.2021

ВНЕСОК ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ В РОЗВИТОК НАУКИ І ТЕХНІКИ НЕЗАЛЕЖНОЇ УКРАЇНИ

24 серпня 2021 р. громадяни нашої країни відзначили найбільше державне свято – 30 років незалежності України. Наукові інститути Національної академії наук України, в тому числі їх бібліотеки, були залучені до популяризації досягнень української науки на міжнародному рівні. Президія Національної академії наук України ухвалила Постанову від 03.03.2021 № 82 «Про заходи НАН України з відзначення 30-ї річниці Незалежності України». У відповідь на цю Постанову Інформаційно-бібліотечна рада Національної бібліотеки України імені І.В. Вернадського як загальнодержавного наукового центру та головної бібліотеки країни, запропонувала рекомендації щодо проведення заходів у бібліотеках академічних установ. Науково-технічна бібліотека ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України долучилася до проведення таких заходів. Таким чином було організовано три виставки літератури за цією тематикою. Також були оформлені віртуальні виставки та їх відеоогляди в соціальних мережах.

14.06.21 р. в читальному залі бібліотеки Інституту електрозварювання розпочала діяти виставка літератури «Місце ІЕЗ ім. Є.О. Патона в історії незалежної України», що збіглася з відвідуванням бібліотеки членів президії Комітету з державних премій України в галузі науки і техніки. Саме з цієї виставки бібліотека розпочала здійснювати заходи, присвячені відзначенню 30-річчя незалежності України. На цій виставці розміщено 10 видань за 2004–2021 рр. на трьох мовах (україн-

ська, російська, англійська). Книги, тематичні журнали та брошури розміщені за алфавітним принципом. Зміст представлених на цій виставці видань інформує про основні напрямки розвитку науково-технічної і виробничої діяльності Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона, основні напрями досліджень, події створення, становлення і розвитку інституту, його наукові здобутки та міжнародну діяльність. Також подана інформація про інститут як найбільший в світі науковий центр зварювання та спеціального електрозварювання в сучасній історії науки, його місце в історії виникнення і розвитку зварювання металів. Продемонстровані також видання про Дослідне конструкторсько-технологічне бюро та Дослідний завод зварювального устаткування як складові Науково-технічного комплексу «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України». Також читача ознайомлено з літературою про всесвітньо відому патонівську науково-інженерну школу в галузі зварювання та споріднених технологій, її роль в розвитку світової зварювальної науки і техніки та відомості про її славетних представників. Для зручності книжкова виставка була експонована в лівій частині читального залу бібліотеки, яка не використовується масово для обслуговування читачів. В очікуванні зниження відвідуваності виставки через карантинні обмеження паралельно з традиційною книжковою виставкою створено віртуальну електронну вітрину цієї літератури та представлено на web-сторінці бібліотеки на



Віртуальна виставка літератури «Місце ІЕЗ ім. Є.О. Патона в історії незалежної України»

сайті інституту [<https://paton.kiev.ua/dopomizhni-viddili/naukovo-techchna-biblioteka>]. Аналогічну презентацію завантажено на сторінку бібліотеки в соціальній мережі Facebook [facebook.com/LibraryPaton] для максимального приваблення відвідувачів та активізації читачького інтересу.

Для того, аби не перевантажувати літературою експозицію були представлені не всі документи за цією темою, які є у фондах бібліотеки. Але організація книжкової виставки в різних форматах і на різних платформах забезпечила інформованість не лише користувачів бібліотеки, але і іншу аудиторію завдяки можливості дистанційного перегляду.

Борис Євгенович Патон – видатний український вчений зі світовим ім'ям. Важко переоцінити його значення для української науки. Саме тому 12 серпня 2021 р., за тиждень до першої річниці з дня смерті Бориса Євгеновича, в бібліотеці інституту була оформлена окрема ілюстрована виставка літератури та показана його безпосередня роль в історії незалежної України. Традиційно така виставка була продубльована в електронному форматі на сайті Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона та на сторінці бібліотеки інституту в соціальній мережі Facebook. Для огляду представлено літературу, що вийшла у 1998–2021 рр.

двома мовами: українською та російською. Електронну вітрину систематизовано за тематикою в декілька розділів, а в межах розділу – за абеткою авторів та назв видань. Розподіл представлених документів досить умовний, оскільки і життя, і творчість, і державна та громадська діяльність Бориса Патона нерозривно пов'язані між собою. Для розкриття теми виставки використовувалися різні види документів: наукова періодика, преса, книги, в тому числі бібліографічні матеріали, які висвітлюють життєвий і творчий шлях легендарного українського вченого Б.Є. Патона.

Література розподілена на такі блоки, як документи про життєвий шлях Б.Є. Патона, про нього як організатора науки та його наукову діяльність. В першому розділі переважно висвітлено основні етапи життя видатного українського вченого Бориса Патона. В другому – роль Б.Є. Патона у розвитку науки і техніки України, його діяльність як організатора науки. Окремлена його роль у розвитку досліджень в галузі фізико-технічних і математичних наук у НАН України, хімічних і біологічних досліджень, соціогуманітарних досліджень у роки незалежності України та його значення у розвитку міжнародних наукових зв'язків. Окремим підрозділом, як приклад, наведено деякі видання, що показують вплив авторитету Бориса Патона на



Традиційна виставка літератури «Борис Євгенович Патон – символ української науки»



Відеоогляд в мережі Facebook книжкової виставки «Вчені ІЕЗ – творці української науки»

наукову спільноту, як от значення у становленні Національного дендрологічного парку «Софіївка», Головної астрономічної обсерваторії України, Куйбишевського індустріально-педагогічного технікуму, спогади про доленосу зустріч на той час студента факультету промисловості цивільного будівництва (нині Академія одеського державного будівництва і архітектури) Г. Верболова. Третій – напрямки наукової діяльності Б.С. Патона, огляд в літературі його робіт, бібліографію та добірку найбільш важливих публікацій, які мали інноваційний характер та непересічний вплив на розвиток провідних галузей промисловості країни.

Варто зазначити, що на виставці представлена лише незначна частина літератури про Бориса Євгеновича Патона, наявна у фондах бібліотеки, але достатня для відображення багатогранності та унікальності його особистості.

Після бібліографічного опису представленої на виставці літератури вказано шифр її зберігання у фондах науково-технічної бібліотеки. Загалом, ця виставка демонструє 18 документів, що з різних сторін характеризують науковий і соціальний портрет Бориса Євгеновича Патона, його роль в збереженні наукового потенціалу України.

20.08.21 р. в читальному залі бібліотеки розпочала діяти остання виставка літератури під наз-

вою «Вчені ІЕЗ – творці української науки», що приурочена до відзначення 30-річчя незалежності України. На цій виставці розміщено 25 видань на двох мовах (українська, російська). Видання в електронному форматі виставки розміщені у зворотньому хронологічному порядку, в межах року – за абеткою авторів та назв. На виставці представлені роботи переважно представників та послідовників патонівської школи, які творили в часи незалежної України. На наш погляд, саме ці видання як найкраще демонструють фундаментальні дослідження працівників Інституту електрозварювання безпосередньо в області зварювання і суміжних процесів не лише в українській, але і в світовій науці в цілому.

Резюмуємо, що такі заходи сприяють популяризації досягнень Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона та його вчених у світі через залучення широкої аудиторії. Всі ці виставки літератури в традиційному форматі перебуватимуть на стелажах в читальному залі бібліотеки до кінця 2021 р. Бажаючи зможуть детальніше ознайомитися з цими матеріалами через абонемент бібліотеки, а також на сайті інституту та у соціальній мережі, використовуючи наші впізнавані хештеги #НТБ_ІЕЗ та #LibraryPaton.

Іваненко С.В., Левченко Ю. С., Шидловська М. М.

IV МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕТОДИ НЕОРГАНІЧНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА»

З 20 по 21 вересня 2021 р. в Грузії в Інституті металургії та матеріалознавства ім. Фердинанда Тавадзе відбулася IV Міжнародна конференція «Сучасні технології та методи неорганічного матеріалознавства» («Modern technologies and methods of inorganic materials science», IMS 2021), присвячена 75-річчю від дня заснування Інституту.



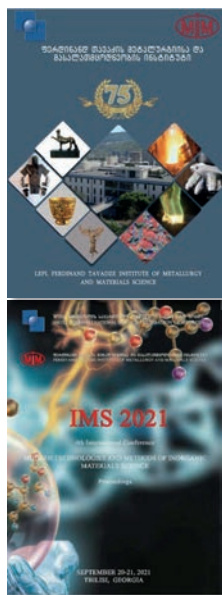
Гіоргій Тавадзе (1945–2021)

Інститут металургії та матеріалознавства ім. Фердинанда Тавадзе був заснований у 1945 р. на базі лабораторії металургії Інституту хімії ім. П. Меликишвілі, що входить в систему Академії наук Грузії, з назвою Інститут металу і гірничої справи. З 1957 р. він згадувався як Інститут металургії, а з 2002 р. – Інститут металургії та матеріалознавства. З 1951 р. очолював інститут академік Фердинанд Тавадзе, ім'я якого інститут носить з 1990 р.

Конференція була профінансована Національним науковим фондом ім. Шота Руставелі та проводилася в гібридному режимі (офлайн, онлайн).

Конференція регулярно проводилася з 2012 р. під керівництвом відомого вченого Гіоргія Тавадзе, професора, академіка НАН Грузії, який очолював Інститут металургії та матеріалознавства ім. Фердинанда Тавадзе з 2006 по 2021 роки. На превеликий жаль, Гіоргій Тавадзе в січні 2021 р. пішов з життя.

На конференції була представлена книга про історію та досягнення Інституту металургії та матеріалознавства ім. Фердинанда Тавадзе, складена за архівними матеріалами інституту, починаючи з часу його заснування.



Організаторами конференції виступили Національна академія наук Грузії, Інститут металургії та матеріалознавства ім. Фердинанда Тавадзе і Міжнародний науковий комітет, який об'єднує відомих фахівців: Gachechiladze Archil, Badzoshvili Tamar, Abashidze Nino, Antashvili Levan, Khantadze Jumber, Khvadagiani Avtandil, Peikrishvili Akaki, Namicheishvili Teimuraz, Rusishvili Zurab, Tsagareishvili Otari, Tsitsishvili Vladimir, Todadze Aleksandre (Georgia); Berner Alex (Israel), Ivasishin Orest, Solonin Yuriy (Ukraine); Mukasyan Alexander (USA); Alymov Mikheil (Russia); Onuralp Yucel (Turkey).

Відкрив конференцію Зураб Русішвілі, директор Інституту металургії та матеріалознавства ім. Фердинанда Тавадзе, який очолює його в 2021 р. У роботі конференції, що проходила у вигляді сесій пленарних і стендових доповідей було представлено 60 робіт авторів з університетів та науково-дослідних інститутів і центрів з Грузії, Казахстану, США, Туреччини, України, Ізраїлю, Росії, Німеччини та Австралії. На пленарних засіданнях було представлено 28 доповідей.

Були визначені наступні актуальні напрямки:

- технології отримання нових матеріалів з твердими, тугоплавкими, напівпровідниковими, корозійностійкими і іншими особливими властивостями з використанням переважно високотемпературного синтезу;
- методи дослідження структурних, фізико-хімічних і механічних властивостей матеріалів;
- моделювання технологічних процесів: плавка, електроліз, хімічний синтез;
- методи отримання надпровідних матеріалів і дослідження фізичних властивостей.

Всі представлені повні тексти доповідей опубліковані в електронному вигляді. З переліком доповідей можна ознайомитися на сайті інституту <http://www.mmi.ge>.

Від фахівців з Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України були представлені доповіді, присвячені новій технології отримання великих монокристалів тугоплавких металів методом плазменно-індукційного вирощування, а також питанням матеріалознавства при отриманні зварних з'єднань при лазерному зварюванні:

- «Production of super large tungsten single crystals», V. Shapovalov, O. Berdnikova, Yu. Nikitenko, V. Yakusha, O. Gnizdylo;
- «The application of additive technologies to control the process of segregation in the production of ingots and casting», V. Shapovalov, E. Shapovalov, R. Kachan, T. Skuba, O. Berdnikova;
- «Laser and hybrid welded joints of low-alloy high-strength steels: the relationship of structure and operation properties», O. Berdnikova, V. Sydorets, A. Bernatskyi, T. Alekseenko, O. Bushma, I. Alekseenko.

Міжнародна конференція «Сучасні технології та методи неорганічного матеріалознавства» відбулась як форум високого наукового рівня і стала науковою платформою для широкого обміну інформацією між експертами та сприяла розвитку співробітництва між вченими.

Наступну, п'яту міжнародну конференцію «Сучасні технології та методи неорганічного матеріалознавства», планується провести у 2024 р.

Олена Берднікова, Ніно Абашидзе

VII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ HighMatTech-2021

З 5 по 7 жовтня 2021 р. у Києві в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відбулася VII Міжнародна конференція HighMatTech-2021. Конференція проводилась у офлайн та онлайн режимах, мова конференції англійська.

Організаторами конференції виступили Українське матеріалознавче товариство ім. І. М. Францевича, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», МОН України та Міжнародний науковий комітет, до складу якого увійшли Andrey Ragulya, Yury Solonin, Petro Loboda, Maryna Storozhenko, Gennadiy Bagliuk, Yuriy Bogomol, Andriy Buketov, Sergiy Firstov, Tetyana Konstantinova, Yevstakhiy Kryzhanivky, Tetyana Prikhna, Viktor Rud, Anatoliy Sanin, Volodymyr Turkevych, Ihor Zavaliy, Roman Yavetskiy, Oleksandr Vasiliev, Petro Smertenko (Ukraine); Levan Chkhartishvili (Georgia); Yury Gogotsi, Richard Haber (USA); Mathias Herrmann (Germany); Viktor Mironov (Latvia); Lech Pawlowski (France); Maksim Antonov (Estonia); Virupaxi Auradi (India).

Урочисто відкрив конференцію голова оргкомітету к.т.н. Олександр Васильєв (Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, Україна). Пленарні доповіді представили відомі вчені: проф. Andrey Ragulya (President of Frantsevich Ukrainian Materials Research Society, Kyiv, Ukraine); Prof. Gogotsi Yury (Drexel University Materials Science & Engineering, Philadelphia, USA); Dr. Franke Ralf (International Sales Manager Eastern Europe); Prof. Prichna Tatiana (Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine); Antonov Maksim (Tallinn Technical University, Estonia);



Представники міжнародного наукового комітету конференції HighMatTech-2021

Bilan Iryna (Frantsevich Institute for Problems of Materials Science National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine); Prof. Igor Lukyanchuk (University of Picardy, France Laboratory of Cond. Mat. Physics, Amiens, France).

Конференція була присвячена матеріалознавчим питанням від фундаментальних основ сучасного матеріалознавства до розроблення сучасних матеріалів та їх практичного використання, вивченню їх фізико-хімічних та механічних властивостей, а також новим технологіям. Робота конференції проходила у вигляді пленарних доповідей, тематичних симпозіумів та стендових презентацій. Усього було представлено 110 робіт, з яких 48 доповідей наживо. У конференції приймали участь фахівці, які працюють у різних галузях знань, включаючи фізику, хімію, медицину, біологію, металознавство тощо. Актуальними напрямками у роботі конференції були: композиційні матеріали, інженерія поверхні та захисні покриття, метали та сплави, наноматеріали, кераміка.

Від колективів авторів, співробітників Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України були представлені доповіді, присвячені перспективним технологіям отримання зварних з'єднань при підводному та лазерному зварюванні, а також вивченню структурно-фазових особливостей цих з'єднань:

«Use of mathematical modelling to optimize the external influence on the processes in the dislocation structure during underwater welding», *Berdnikova Olena, Maksimov Sergey, Prilipko Olena*;

«Laser spot welding in different spatial positions», *Bernatskyi Artemii, Berdnikova Olena, Kushnarova Olha, Klochkov Illia, Motrunich Sviatoslav*.

Також дослідниками Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України у співавторстві із співробітниками з Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України були представлені доповіді:

«High Young's modulus magnesium alloy strengthening by icosahedral quasicrystals», *Maksymchuk Ihor, Khrypliviy Anatoliy, Frizel Viktor, Khokhlova Julia, Khohlov Maxim*;

«Magnetic, electric and thermoelectric properties of Co/Al₂O₃, Co/SiO₂ and Co/TiO₂ ferromagnetic nanocomposites», *Baibara Oleksii, Radchenko M.V., Bykov O.I., Stelmakh Y.A., Krushinskaya L.A., Ievtushenko A.I.*

Доповіді конференції HighMatTech-2021 опубліковані в електронному вигляді, з ними можна ознайомитися на сайті Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

Олена Берднікова

XI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

**Математичне моделювання
та інформаційні технології в зварюванні
та споріднених процесах**

12–16 вересня 2022 р., Одеса, готель «Аркадія»
Голова програмного комітету академік І.В. Кривцун



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 серпня 2022 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць десяти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/mmww>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.08.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 05.09.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 12.09.2022 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11,
м. Київ, 03150, Україна
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/ukr/mmi2022>

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

III МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

12–16 вересня 2022

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Тематика конференції

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Наукові дослідження та розробки в області неруйнівного контролю (НК) і моніторингу технічного стану • Застосування методів НК: радіаційного, ультразвукового, магнітного, вихрострумового, капілярного, теплового, візуально-оптичного, електричного; контролю герметичності та ін. в промисловості • Технічна діагностика та моніторинг технічного стану об'єктів підвищеної небезпеки методами НК • Нові дефектоскопічні матеріали та обладнання | <ul style="list-style-type: none"> • Акустико-емісійний та вібраційний контроль • Аналіз пружно-деформованого стану зварних металоконструкцій • Оцінка відповідності та стандартизація в НК • НК в енергетичній галузі • НК в нафтогазовій галузі • НК на транспорті • ВИСТАВКА ЗАСОБІВ НК |
|---|---|

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.08.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 05.09.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 12.09.2022 р.

ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50
journal@paton.kiev.ua
posypaiko.yurii@gmail.com
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2022>

ПЕРЕДПЛАТА 2022

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	240	720	1440	2880
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	240	480	960
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	240	480	960
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	520	1560	3120	6240

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделоллю.

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

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

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

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

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

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

На сайті видавництва у 2022 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2020 рр.



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



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



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

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

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

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

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

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

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

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: 38044 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>