Автоматичне зварювання

6 2024

Avtomatychne Zvaryuvannya

Видається з 1948 р. Published since 1948

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Мельниченко Т.В., Устінов А.І., Клепко О.Ю., Самофалов О.В. Дифузійне з'єднання сплаву Ті6-4 через багатошарові прошарки евтектичного складу на основі системи Ті–Cu 3

Максимов С.Ю., Войнарович С.Г., Калюжний С.М., Кислиця О.М., Свірідова І.С., Алонцева Д.Л., Yamanoglu R. Покриття для медичного застосування, отримане методом мікроплазмового напилення сплаву Zr–Nb 10

Молтасов А.В., Ткач П.М., Димань М.М., Ткач І.Г., Кот В.Г. Особливості розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень у тонколистових стикових зварних з'єднаннях з урахуванням початкової кутової деформації 17

Імбірович Н.Ю., Повстяной О.Ю., Куржидловський К.Я., Ткачук В.В. Формування пористих покриттів на титанових сплавах методом плазмоелектролітного оксидування в лужних електролітах, насичених фосфатами та біо-добавками 23

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Матвійчук В.А. Компенсація просторової деформації у виробах при адитивному електронно-променевому наплавленні30

Горпенко А.О., Семенець О.І. Вплив стану поверхні на опір втоми зразків з отвором зі сплаву ВТ22 при відновлювальному наплавлені 35

Шаповалов Є.В., Новодранов А.С., Ващенко В.М., Савицький О.М., Кліщар Ф.С. Робототехнічний комплекс для багатошарового наплавлення дугою періодичної дії та контролю поверхневих дефектів наплавленого металу 43

Ланкін Ю.М., Семікін В.Ф., Байштрук Є.М., Романова І.Ю. Характеристики джерел живлення установок ЕШЗ/ЕШП з фазоімпульсним регулюванням тиристорів 51

ІНФОРМАЦІЯ

Застосування офіційних текстів національних та міжнародних стандартів 58

Виставка транспортних технологій INNOTRANS 2024.....59

Виставка FABTECH-2024 61

Міжнародна промислова виставка в м. Брно 64

Чеська компанія SAZ s.r.o. – надійна техніка для залізниці ...65

«ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» – підсумки року та інновації для майбутнього.....67

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Melnychenko T.V., Ustinov A.I., Klepko O.Yu., Samofalov O.V. Diffusion bonding of TI6-4 alloy through multilayer interlayers of an eutectic composition based on Ti–Cu system 3

Maksymov S.Yu., Voinarovych S.G., Kaliuzhnyi S.N., Kyslytsia O.N., Sviridova I.S., Alontseva D.L., Yamanoglu R. Coating for medical application produced by microplasma spraying from Zr-Nb alloy 10

Moltasov A.V., Tkach P.M., Dyman M.M., Tkach I.G., Kot V.G. Peculiarities of calculation of stress concentration factors in thin-sheet butt welded joints with the consideration of initial angular deformation.....17

Imbirovych N.Yu., Povstyanoy O.Yu., Kurdzydlowski K.J., Tkachuk V.V. Formation of porous coatings on titanium alloys by the method of plasma electrolytic oxidation in alkaline electrolytes saturated with phosphates and bio-additives 23

INDUSTRIAL

Matviichuk V.A. Compensation of spatial deformation of parts at additive electron-beam surfacing.....30

Gorpenko A.O., Semenets O.I. Influence of the condition of the surface on the fatigue resistance of samples with hole from VT22 alloy at restorative surfacing 35

Shapovalov E.V., Novodranov A.S., Vashchenko V.M., Savytskyi O.M., Klishchar F.S. Robotic complex for multilayer surfacing by periodic arc and control of surface defects of the deposited metal 43

Lankin Yu.M., Semikin V.F., Bayshtruk Ye.M., Romanova I.Yu. Characteristics of power sources of ESW/ESM installations with phase-pulse regulation of thyristors 51

INFORMATION

Application of official texts of national and international standards 58

Exhibition of transport technologies INNOTRANS 2024 59

FABTECH-2024 exhibition.....61

International industrial exhibition in Brno.....64

Czech company SAZ s.r.o. – reliable machinery for railways.....65

«DNIPROMETYZ TAS» year-end results and innovations for the future 67

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну в Міжнародному інституті зварювання та в Європейській зварювальній федерації

The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine in International Institute of Welding and in European Federation for Welding

© Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2024

© E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, International Association «Welding», 2024

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (Київ):
І.В. Крівцун (головний редактор),
О.М. Берднікова, **В.В. Книш**,
В.М. Коржик, **Ю.М. Ланкін**,
Л.М. Лобанов, **С.Ю. Максимов**,
О.В. Махненко, М.О. Пащин,
В.Д. Позняков, **І.О. Рябцев,**
І.Ю. Романова – відповідальний секретар;
В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;
В.В. Квасницький, **Є.П. Чвертко**,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;
А.Л. Майстренко,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ;
В.В. Перемітько,
Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське;
У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,
Аахен, Німеччина.
Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко,
Міжнародна Асоціація «Зварювання», Київ

Видавець
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

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

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

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу

Журнал зареєстровано Національною радою України з
питань телебачення і радіомовлення 9 травня 2024 року,
ідентифікатор медіа R30-04566.
ISSN 3041-2374 print
ISSN 3041-234X online
DOI: http://dx.doi.org/10.37434/as

Передплата 2025
Передплатний індекс 70031.
6 випусків на рік (видається раз на два місяці).
Друкована версія: 1800 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.
Електронна версія: 1800 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журнала).
Передплата можлива на попередні випуски за любий рік.

Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевидаються англійською мовою в журналі
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute
of NASU (Kyiv, Ukraine):
I.V. Krivtsun (Editor-in-Chief),
O.M. Berdnikova, **V.V. Knysh**,
V.M. Korzhyk, **Yu.M. Lankin**,
L.M. Lobanov, **S.Yu. Maksimov**,
O.V. Makhnenko, M.O. Pashchin,
V.D. Poznyakov, **I.O. Ryabtsev**,
I.Yu. Romanova – Executive Secretary;
V.V. Dmitrik, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Kharkiv, Ukraine;
V.V. Kvasnytskyi, **E.P. Chvertko**, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
A.L. Maistrenko, V. Bakul Institute for Superhard Materials
of the NASU, Kyiv, Ukraine;
V. V. Peremitko, Dniprovsky State Technical University,
Kamianske, Ukraine;
U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany.
Executive Director – O.T. Zelnichenko,
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Publisher
International Association «Welding»

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

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 131, 132, 151.
Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for publishing Editorial Board of the Journal

The Journal was registered by the National Council of Ukraine
on Television and Radio Broadcasting on 09.05.2024,
carrier identifier R30-04566.
ISSN 3041-2374 print
ISSN 3041-234X online
DOI: http://dx.doi.org/10.37434/as

Subscription 2025
Subscription index 70031.
6 issues per year, back issues available.
$192, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
$156, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
Subscription is possible for previous issues for any year.

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

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

Підписано до друку 13.12.2024.
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 8,6.
Друк ТОВ «ДІА». 03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

УДК 621.791.37 DOI: https://doi.org/10.37434/as2024.06.01

ДИФУЗІЙНЕ З'ЄДНАННЯ СПЛАВУ Ti6-4 ЧЕРЕЗ БАГАТОШАРОВІ ПРОШАРКИ ЕВТЕКТИЧНОГО СКЛАДУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ Ti–Cu

Т.В. Мельниченко, А.І. Устінов, О.Ю. Клепко, О.В. Самофалов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: melnychenko21@ukr.net

У роботі досліджено закономірності дифузійного з'єднання титанового сплаву Ti6-4 з використанням проміжних багатошарових прошарків евтектичного складу на основі системи Ti–Cu, отриманих методом електронно-променевого осадження в вакуумі. Аналіз мікроструктури та механічних властивостей з'єднань виконано з використанням скануючої електронної мікроскопії та шляхом визначення міцності на зріз. Показано, що проміжні багатошарові прошарки забезпечують отримання бездефектних з'єднань без деградації властивостей титанового сплаву при температурі 920…950 ºС, яка відповідає інтервалу плавлення прошарку. Встановлено, що характер реакційної взаємодії компонентів прошарку та сплаву Ti6-4 при нагріванні залежить від температури та інтервалу плавлення проміжного прошарку та визначає мікроструктуру і фазовий склад з'єднання. Відсутність у з'єднанні суцільних шарів інтерметалідів (TiCu, Ti_2Cu) та формування дисперсної Відманштеттенової структури з вмістом міді та нікелю < 7 ат. % забезпечує міцність з'єднання на рівні сплаву Ti6-4. Бібліогр. 15, табл. 5, рис. 8.

Ключові слова: багатошарові фольги, електронно-променеве осадження; сплав Ti6-4; дифузійне з'єднання, мікроструктура, міцність на зріз

Вступ. Титановий сплав Ti6-4 відноситься до типу α+β, що забезпечує йому високі значення ударної в'язкості при кімнатній температурі та опору повзучості при високій температурі. Завдяки низькій питомій вазі, високій корозійній стійкості та питомій міцності сплав широко використовується в аерокосмічній, автомобілебудівній, суднобудівній галузях, атомній енергетиці, медицині тощо [1, 2]. За статистичними даними більше 50 % титану, що використовується в аерокосмічній промисловості, припадає на сплав Ti6-4, з якого виготовляють великогабаритні зварні та збірні конструкції літальних апаратів, балони високого тиску, що працюють в інтервалі температури 196…450 ºС, та інші конструктивні елементи. Однак отримання сучасних виробів, зокрема складної форми та тонкостінних, потребує технології з'єднання їх окремих елементів, яка, з одного боку, буде запобігати деградації структурних і механічних характеристик сплаву, а з іншого, є надійною та низьковитратною. З'єднання сплаву Ti6-4 виконують різними методами: дуговим, електронно-променевим, лазерним, дифузійним зварюванням та високотемпературним паянням [3, 4]. Зварювання титанового сплаву Ti6-4 традиційними методами виконується при високій температурі та супроводжується структурними перетвореннями в матеріалі, зростанням зерна, формуванням крихких інтерметалідів, метастабільних фаз, дефектів та пор, що призводить до зниження показників міцності сплаву та формування залишкових напружень у з'єднанні [5, 6]. Найбільш прийнятним для формування з'єднання сплаву є метод високотемпературного вакуумного паяння, оскільки процес відбувається у вакуумі, що запобігає окисленню сплаву та не потребує використання флюсу з подальшим очищенням поверхні з'єднання від забруднення та продуктів корозії. Відсутність значних стискаючих зусиль дозволяє з'єднувати деталі з тонкими стінками та складної форми. Зважаючи на високу температуру α↔β перетворення в сплаві Ti6-4 (970…1010 ºС [7]), паяння проводять з використанням високотемпературних припоїв, найпоширенішими з яких є припої на основі систем Ti–Cu–Ni та Ti–Zr–Cu–Ni, при температурі 980…1040 ºС, близькій до температури фазового перетворення. Ці припої є найбільш прийнятними для отримання з'єднань, що використовуються при температурі ~ 600 ºС та агресивному середовищі і мають міцність на зріз ~ 50…70 % від основного матеріалу [8]. Використання високотемпературних припоїв при певних технологічних параметрах забезпечує високі показники міцності з'єднання [9], а для формування дуплексної структури та відновлення механічних властивостей титанового сплаву проводять додаткову термообробку [10]. Однак паяння тонкостінних та виготовлених з деформаційнозміцнених сплавів елементів конструкцій

Мельниченко – Т.В. https://orcid.org/0000-0002-1460-5532, Устінов А.І. – https://orcid.org/0000-0002-8855-3499, Клепко О.Ю. – https://orcid.org/0000-0003-2014-1938, Самофалов О.В. – https://orcid.org/0009-0007-2925-1566
© Т.В. Мельниченко, А.І. Устінов, О.Ю. Клепко, О.В. Самофалов, 2024

бажано проводити при більш низькій температурі через можливу деградацію структури титанового сплаву. Зниження температури паяння необхідно також при виготовленні конструкцій, які складаються з елементів різного хімічного складу. Тому розробка нових методів з'єднання сплаву Ті6-4, що забезпечать зниження рівня термічного впливу на сплав, є актуальним. Відомо, що використання проміжних багатошарових прошарків, в яких при нагріванні дифузійні процеси перемішування компонентів проходять з аномально високою швидкістю, дозволяє знизити температуру процесу формування з'єднання [11]. З цієї точки зору, з'єднання титанового сплаву Ті6-4 доцільно проводити з використанням багатошарових прошарків на основі систем з евтектикою, яка має температуру плавлення < 980 ºС, що буде запобігати деградації структурних характеристик сплаву. Перевагою такого підходу є швидке формування тонкого прошарку рідкої фази в стику за рахунок інтенсивного дифузійного перемішування компонентів багатошарового прошарку, що забезпечить змочування поверхонь з'єднання та їх фізичний контакт при низькому зусиллі стискання. У роботі проведено дослідження закономірностей формування структури та механічних властивостей з'єднань сплаву Ті6-4, отриманих дифузійним з'єднанням через проміжні багатошарові прошарки на основі систем з евтектикою Ti–Cu та Ti–Cu–Ni в області температури 920…950 ºС.

Матеріали та методи. Проміжні прошарки у вигляді багатошарової фольги (БФ) хімічного складу, близького до складу подвійних евтектик I та II системи Ti–Cu (рис. 1, *а*) та потрійної евтектики III системи Ti–Cu–Ni (рис. 1, *б*), було отримано методом пошарового електронно-променевого осадження компонентів на підкладку, що обертається, докладно описаним у [14]. Схему отримання БФ показано на рис. 1, *в*.

Співвідношення товщин шарів компонентів двокомпонентної БФ визначається співвідношенням інтенсивностей їх парових потоків. Період чергування шарів (сума товщин шарів двох компонентів) при певній інтенсивності випаровування визначається швидкістю обертання підкладки. Тиск у камері при осадженні підтримується на рівні 10^{-3} Па. Температуру підкладки підтримували нижчою за 300 ºС, що запобігало дифузійному перемішуванню компонентів шарів. При швидкості обертання підкладки 2 хв$^{-1}$ отримано БФ з періодом чергування шарів 500 нм та завтовшки 35 мкм. Необхідний хімічний склад трикомпонентної БФ Ti–Cu–Ni забезпечували плакуванням прошарку Ti–Cu шарами нікелю певної товщини шляхом випаровування додаткового зливка нікелю. На рис. 2, *а* показа-

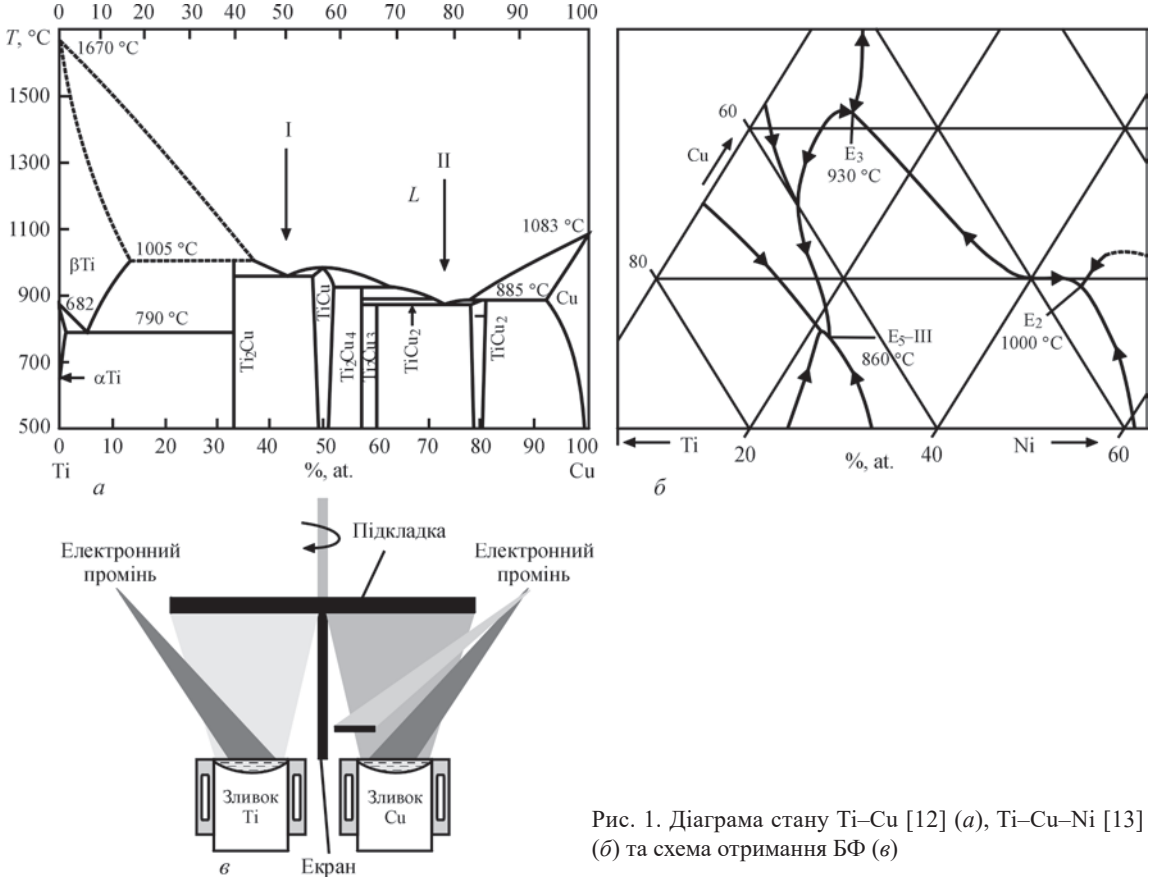


Рис. 1. Діаграма стану Ti–Cu [12] (*а*), Ti–Cu–Ni [13] (*б*) та схема отримання БФ (*в*)

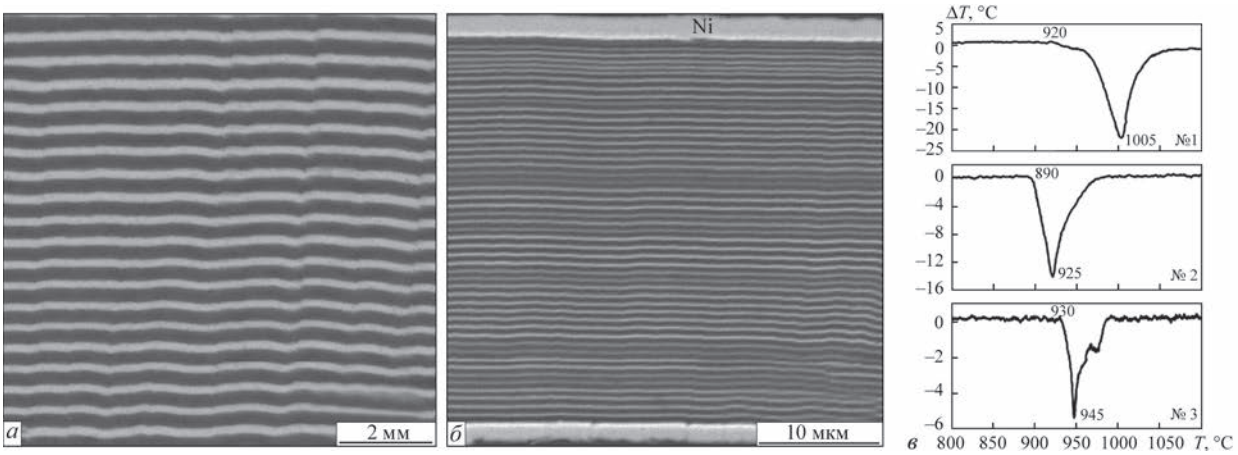


Рис. 2. СЕМ зображення поперечного перерізу БФ Ti/Cu № 1 з періодом шарів 500 нм (*а*), БФ Ti–Cu–Ni № 3 (*б*), фрагменти кривих ДТА БФ (*в*)

но мікроструктуру двокомпонентної БФ Ti/Cu, а на рис. 2, *б* – загальний вигляд трикомпонентної фольги Ti–Cu–Ni. У табл. 1 наведено хімічний склад двокомпонентної та трикомпонентної БФ. Визначення температури плавлення фольги проводили методом диференційного термічного аналізу (ДТА) на установці ВДТА-2000. На рис. 2, *в* показано фрагменти кривих ДТА в області плавлення фольг різного складу, а в табл. 1 наведено інтервали їх плавлення.

З'єднання сплаву Ti6-4 проводили шляхом нагрівання збірки, що складалася зі зразків сплаву та розміщеної між ними БФ, у вакуумній камері в оснащенні, яке дозволяло фіксувати положення зразків та фольги (рис. 3, *а*). Розміри зразків показано на рис. 3, *б*.

Перед процесом з'єднання проводили шліфування поверхонь зразків на абразивному папері Р1200 та ультразвукове очищення зразків і фольги в ацетоні. Процес з'єднання проводили при температурі 920 та 950 ºС, 60 хв та 980 ºС, 30 хв при зусиллі стискання 70 кПа. Температуру процесу обирали відповідно до температури плавлення БФ. Вакуум у камері підтримували на рівні 10^{-3} Па.

Мікроструктуру та хімічний склад різних ділянок з'єднань досліджували з використанням скануючого електронного мікроскопа CamScan-4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу EDX INCA 200. Зразки для металографічних досліджень готували за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального обладнання фірми Struers. Для оцінки якості з'єднань було проведено випробування зразків на зріз з використанням спеціального оснащення (рис. 3, *в*). Міцність на розтяг зразків стандартної форми за ГОСТом визначали на розривній машині ZDM 4. Середнє значення міцності визначали за результатами випробувань не менше трьох зразків.

Таблиця 1. Характеристики БФ

Номер БФ	Структура БФ	Загальний хімічний склад БФ, ат. %			Інтервал плавлення, ºС
		Ti	Cu	Ni	
1	Ti/Cu	55,7	44,3		920…1005
2	Ti/Cu	22,6	77,4		890…925
3	Ni+Ti/Cu+Ni	67,1	18,1	14,8	930…945

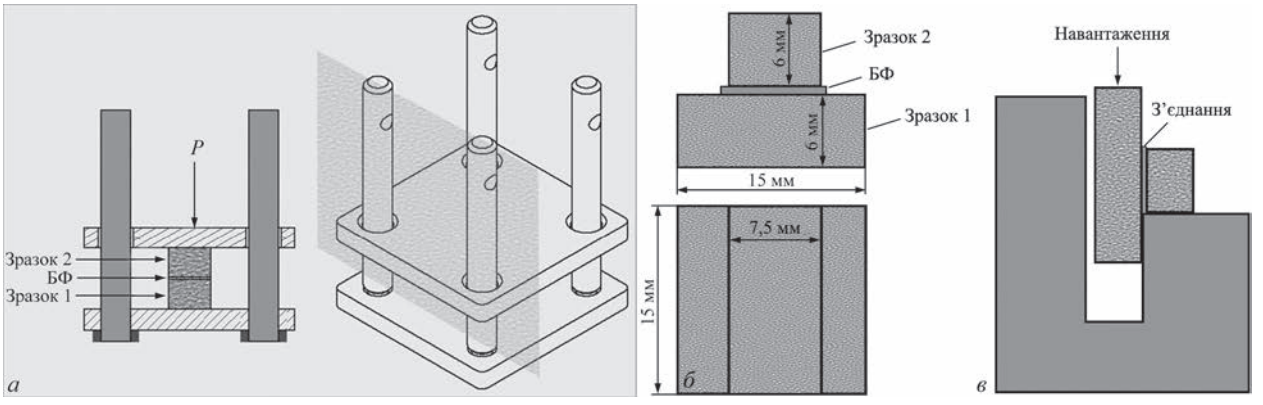


Рис. 3. Схематичне зображення оснащення для проведення процесу з'єднання (*а*), зразків (*б*) та оснащення для випробувань на зріз (*в*)

Таблиця 2. Властивості з'єднань, отриманих при різних режимах

Номер БФ	Температура, ºС	Тривалість, хв	Ширина дифузійної зони, мкм	Міцність на зріз τ, МПа
1	920	60	120	180
	950	60	150	190
2	920	60	123	160
	950	60	190	409
3	920	60	190	453
	950	60	250	532

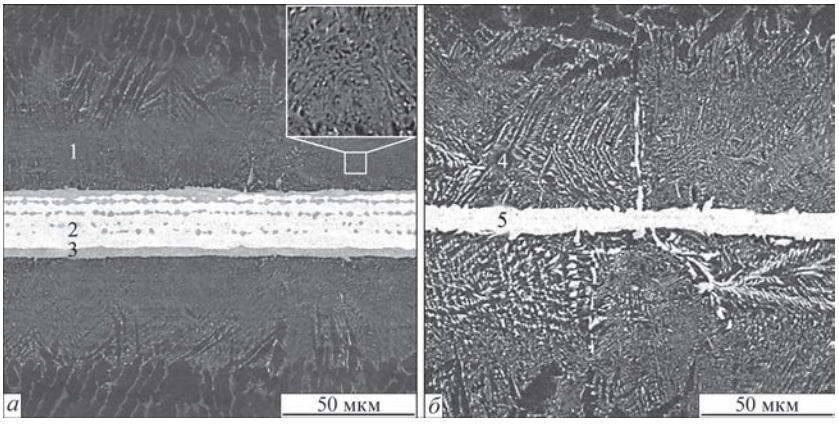


Рис. 4. Мікроструктура з'єднань, отриманих з використанням проміжної БФ № 1 на режимах: 920 ºС, 60 хв (*а*) та 950 ºС, 60 хв (*б*)

Експериментальні результати та їх обговорення. У табл. 2 наведено характеристики з'єднань, отриманих з використанням БФ при різних режимах.

На рис. 4–6 показано мікроструктуру з'єднань. Хімічний та фазовий склад відповідних ділянок дифузійної зони наведено в табл. 3–5. При з'єднанні через БФ № 1 та № 2 у дифузійній зоні формуються області різного хімічного та фазового складу (рис. 4, 5), що є наслідком дифузійного перемішування компонентів БФ і титанового сплаву завдяки змочуванню поверхні сплаву рідкою фазою, яка утворюється при плавленні БФ.

У центральній частині дифузійної зони формується шар на основі інтерметалідів Ti_2Cu та

Таблиця 3. Хімічний та фазовий склад ділянок з'єднань на рис. 4

Ділянка	Хімічний склад, ат. %				Фазовий склад	HV20, ГПа
	Al	Ti	V	Cu		
1	7,81	80,6	3,1	8,49	α-Ti+Ti_2Cu	3,7
2		53,96		46,04	TiCu+Ti_2Cu	3,4
3	1,95	66,4		31,65	Ti_2Cu	
4	7,31	80,11	2,54	10,04	α-Ti+Ti_2Cu	3,8
5	2,37	67,69		29,94	Ti_2Cu	3,0

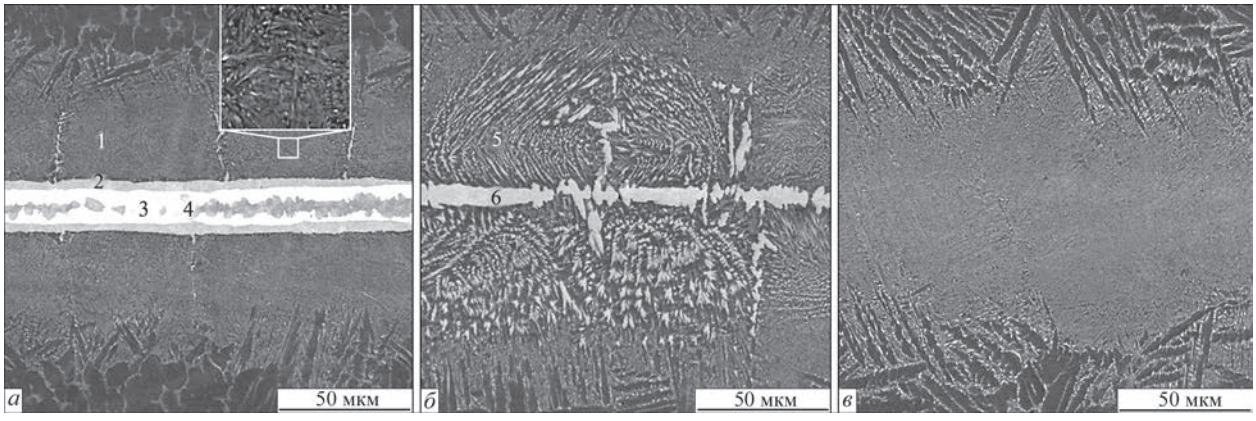


Рис. 5. Мікроструктура з'єднань, отриманих з використанням проміжної БФ № 2 на режимах: 920 ºС, 60 хв (*а*), 950 ºС, 60 хв (*б*), 980 ºС, 30 хв (*в*)

Таблиця 4. Хімічний та фазовий склад ділянок з'єднань на рис. 5

Ділянка	Хімічний склад, ат. %				Фазовий склад	HV20, ГПа
	Al	Ti	V	Cu		
1	8,95	77,29	4,21	9,55	α-Ti+Ti_2Cu	3,7
2	2,43	65,66		31,91	Ti_2Cu	
3		50,43		49,57	TiCu	3,2
4	7,6	59,09		33,31	Ti_2Cu	3,0
5	8,64	77,53	3,57	10,27	α-Ti+Ti_2Cu	3,9
6	2,7	66,81		30,49	Ti_2Cu	3,2

TiCu внаслідок реакційної взаємодії компонентів БФ при нагріванні та зустрічної дифузії міді та титану на інтерфейсі БФ/сплав. Товщина та фазовий склад інтерметалідного шару визначаються хімічним складом БФ і температурою нагрівання. При збільшенні температури товщина інтерметалідного шару зменшується та відбувається його фрагментація. Одночасне його збагачення титаном призводить до формування інтерметаліду Ti_2Cu. Слід зазначити, що інтенсивність дифузійного перемішування титану та міді при використанні БФ № 2 вища. Це можна пояснити збільшенням об'ємної долі рідкої фази в стику при температурі нагрівання 920…950 ºС, що забезпечується меншим інтервалом плавлення БФ № 2 (табл. 1).

Формування інтерметалідного шару в стику можна пояснити таким чином. При нагріванні БФ Ti/Cu до температури плавлення поява рідкої фази в стику сприяє дифузії титану зі сплаву в проміжний прошарок, що призводить до формування надлишкових інтерметалідів TiCu та Ti_2Cu, температура плавлення яких вище температури процесу з'єднання. Можна припустити, що це призводить до зменшення об'ємної долі рідкої фази в стику та обмежує дифузійне перемішування компонентів. На користь цього припущення вказує відсутність інтерметалідного шару в з'єднанні, яке отримано при температурі 980 °С (рис. 5, *в*), що перевищує температуру плавлення інтерметалідів TiCu та Ti_2Cu. Дифузія міді в титановий сплав призводить до зниження температури перетворення α ↔ β, у результаті цього в процесі охолодження в дифузійній зоні відбувається розпад βTi за евтектоїдною реакцією βTi → αTi + Ti_2Cu з формуванням евтектоїду заевтектоїдного складу з дисперсною структурою (ділянка 1 та її збільшений вигляд на рис. 4, *а* та 5, *а*), фазові складові якого укрупнюються при збільшенні температури (ділянки 4 на рис. 4, *б* та 5 на рис. 5, *б*). Між ділянкою з евтектоїдною структурою та Ti6-4 формується область з Відманштеттеновою структурою внаслідок перетворення βTi в голчастий αTi.

При з'єднанні сплаву Ti6-4 через БФ № 3 при температурі 920 та 950 ºС не спостерігається формування в стику шару інтерметалідів (рис. 6).

Можна припустити, що при плавленні фольги формується значний об'єм рідкої фази однорідно-

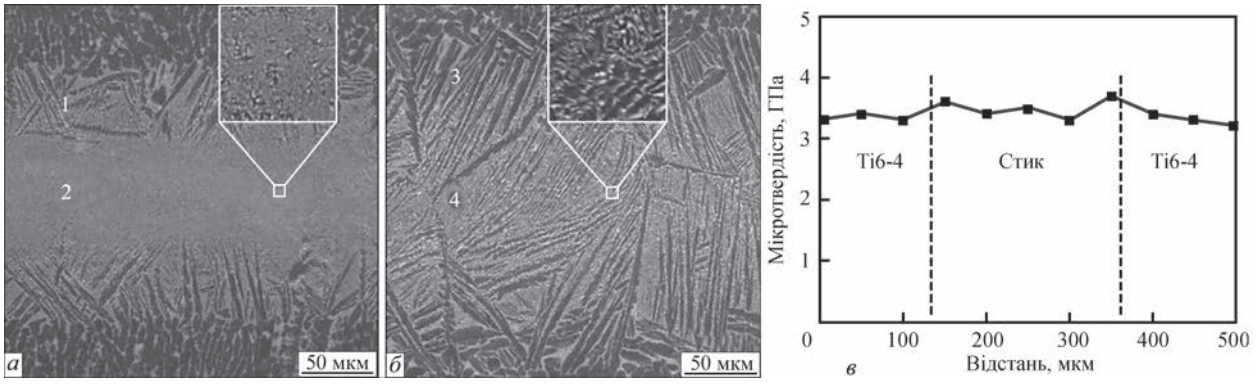


Рис. 6. Мікроструктура з'єднань, отриманих з використанням проміжної БФ № 3 на режимах: 920 ºС, 60 хв (*а*) та 950 ºС, 60 хв (*б*) та розподіл мікротвердості в стику (*в*)

Таблиця 5. Хімічний та фазовий склад ділянок з'єднань на рис. 6

Ділянка	Хімічний склад, ат. %					Фазовий склад
	Al	Ti	V	Ni	Cu	
1	7,86	82,03	3,51	3,35	3,25	α-Ti+Ti_2Cu+Ti_2Ni
2	5,99	81,52	2,52	4,03	5,94	
3	9,44	83,87	3,64	1,47	1,59	
4	8,07	82,46	2,5	2,61	4,35	

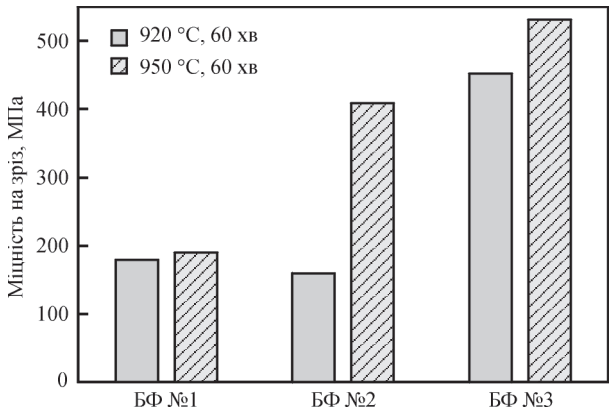


Рис. 7. Міцність на зріз з'єднань

го складу, про що свідчить вузький інтервал плавлення фольги (табл. 1). Це забезпечує інтенсивне дифузійне перемішування компонентів фольги та сплаву і формування суцільного прошарку βTi в стику внаслідок зниження температури перетворення α → β. При охолодженні в з'єднанні формуються дві структурні ділянки. У центральній частині з'єднання (ділянки 2, 4 на рис. 6, *а*, *б*) формується евтектоїд з дисперсною структурою за евтектоїдною реакцією βTi → αTi + Ti_2(Cu) +Ti_2(Ni). Між евтектоїдною ділянкою та металом сплаву наявна область з Відманштеттеновою структурою. При збільшенні температури процесу відбувається укрупнення структурних складових ділянок (рис. 6, *б*). З іншого боку, підвищення температури забезпечує збільшення інтенсивності дифузійного перемішування компонентів БФ та сплаву і ширини дифузійної зони та формування Відманштеттенової структури по всій її ширині, що сприяє однорідності хімічного складу та мікротвердості стику (рис. 6, *б*, *в*).

Для оцінки механічних властивостей з'єднань проведено їх випробування на зріз. На рис. 7 наведено порівняльну діаграму міцності на зріз з'єднань, отриманих при використанні різної БФ.

Видно, що формування в стику суцільного інтерметалідного шару обумовлює низьку міцність з'єднання. Останнє руйнується в області інтерметалідного шару (рис. 8, *а*, *б*), який має мікротвердість, нижчу за сусідні ділянки (табл. 3, 4). Можна припустити, що формування інтерметалідів Ti_2Cu та TiCu внаслідок реакційної дифузії титану та міді при нагріванні супроводжується формуванням дефектів вакансійного типу та пор за рахунок об'ємного ефекту при фазових перетвореннях. Слід зазначити, що формування в стику фрагментованого інтерметалідного прошарку (рис. 5, *б*) сприяє зростанню міцності на зріз з'єднання. Відсутність в стику шару інтерметалідів та формування однорідної структури дифузійної зони забезпечує підвищення механічних властивостей з'єднання. Так, найвищою міцністю на зріз (532 МПа) та розтяг (930 МПа) характеризується з'єднання, отримане з використанням БФ № 3 при температурі 950 ºС, в якому вміст інтерметалідоутворюючих компонентів (Ni+Cu) в стику < 7 ат. %. Міцність з'єднання відповідає рівню міцності сплаву Ti6-4 (σ = 935 МПа при випробуванні на розтяг), що забезпечується однорідністю механічних властивостей ділянок з'єднання (рис. 6, *в*).

При випробуваннях на зріз і розтяг з'єднання руйнується в області сплаву Ti6-4 (рис. 8, *в*, *г*). Отриманий нами результат узгоджується з експериментальними даними авторів [15], одержаними при високотемпературному паянні сплаву Ti6-4 з використанням традиційних припоїв Ti–Zr–Ni–Cu при температурі 950…990 ºС. Перевагою методу дифузійного з'єднання з використанням проміжного прошарку БФ евтектичного складу є можливість зниження температури, необхідної для отримання рівноміцного та бездефектного з'єднання титанового сплаву.

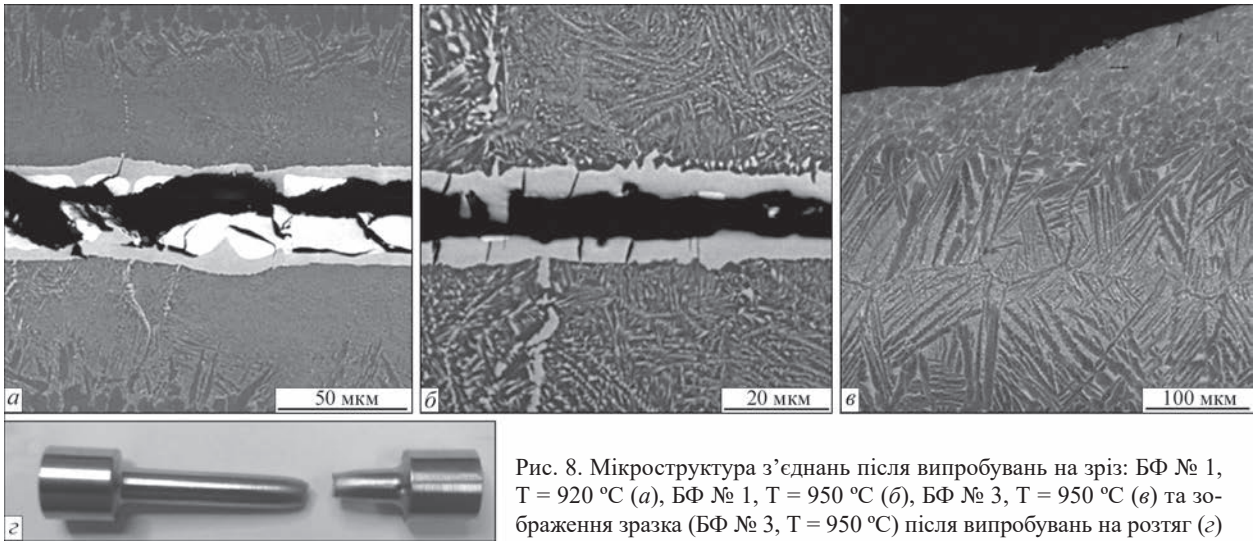


Рис. 8. Мікроструктура з'єднань після випробувань на зріз: БФ № 1, Т = 920 ºС (*а*), БФ № 1, Т = 950 ºС (*б*), БФ № 3, Т = 950 ºС (*в*) та зображення зразка (БФ № 3, Т = 950 ºС) після випробувань на розтяг (*г*)

Висновки

1. Використання проміжних багатошарових прошарків евтектичного складу на основі систем Ti–Cu та Ti–Cu–Ni забезпечує отримання нероз'ємного та бездефектного з'єднання сплаву Ti6-4 методом дифузійного з'єднання при температурі 920…950 ºС.

2. Мікроструктура з'єднання залежить від температури та інтервалу плавлення БФ і визначається реакційною взаємодією компонентів фольги та титанового сплаву при нагріванні. Формування в стику шару інтерметалідів Ti_2Cu та TiCu призводить до зниження механічних властивостей з'єднання.

3. Отримання з'єднання з міцністю на зріз та розтяг, яка відповідає міцності сплаву Ti6-4, забезпечується формуванням в стику дисперсної Відманштеттенової структури з вмістом міді та нікелю < 7 ат. % та однорідним розподілом мікротвердості.

Список літератури/Referenses

1. Leyens, C., Peters, M. (2003) *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. WILEY-VCH, Weinheim.
2. Lutjering, G., Williams, J.C. (2007) *Titanium*. 2 ed. Springer-Verlag, Berlin.
3. Balasubramanian, T., Balasubramanian, V., Muthumanikkam, M. (2011) Fatigue performance of gas tungsten arc, electron beam, and laser beam welded Ti–6Al–4V alloy joints. *J. Mater. Eng. and Performance*, **20**, 1620–1630. DOI: https://doi.org/10.1007/s11665-010-9822-y.
4. Ahmed, Y.M., Salleh, K., Sahari, M., Ishak, M. (2012) *Welding of titanium (Ti–6Al–4V) alloys: A review. In: Proc. of the National Graduate Conf.*, Kajang, Malaysia, 8–10.
5. Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P., Petrichenko, I.K. et al. (2001) Effect of the method of fusion welding on properties of welded joints in alloy Ti–6AI–4V. *The Paton Welding J.*, **4**, 2–6.
6. Murthy, K.K., Potluri, N.B., Sundaresan, S. (1997) Fusion zone microstructure and fatigue crack growth behaviour in Ti–6Al–4V alloy weldments. *Mater. Sci. and Technol.*, 13(**6**), 503–510. DOI: https://doi.org/10.1179/mst.1997.13.6.503
7. Borisova, E.A. (1980) *Titanium alloys*. *Metallography of titanium alloys*. Metallurgiya, Moscow [in Russian].
8. Shapiro, A., Rabinkin, A. (2003) State of the art of titanium-based brazing filler metals. *Welding J.*, 82(**10**), 36–43.
9. Elrefaey, A., Tillmann, W. (2009) Effect of brazing parameters on microstructure and mechanical properties of titanium joints. *J. of Materials Proc. Technology*, **209**, 4842–4849. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.006
10. Shapiro, A.E. (2016) Brazing of conventional titanium alloys. *ASM Metal Handbook*, **6**, 1–25.
11. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Ishchenko, A.Ya et al. (2008) Diffusion welding of γ-TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **16**, 1043–1045. DOI: https://doi.org/10.1016/j.intermet.2008.05.002
12. Murray, J.L. (1983) The Cu–Ti (copper-titanium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 4(**1**), 81–95.
13. Cacciamani, G., Schuster, J.C., Effenberg, G., Ilyenko, S. (2006) Cu–Ni–Ti (copper–nickel–titanium). *Light metal ternary systems: Phase diagrams, crystallographic and thermodynamic data*, **11**, 266–283.
14. Ustinov, A.I., Melnychenko, T.V., Demchenkov, S.A. (2021) Structural mechanism of plastic deformation of Al/a-Si multilayer foils at heating under load. *Materials Science and Engineering*: A, **810**, 141030. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141030
15. Ganjeh, E., Sarkhosh, H., Bajgholi, M.E. et al. (2012) Increasing Ti–6Al–4V brazed joint strength equal to the base metal by Ti and Zr amorphous filler alloys. *Mater. Charact.*, **71**, 31–40. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.016

DIFFUSION BONDING OF TI6-4 ALLOY THROUGH MULTILAYER INTERLAYERS OF AN EUTECTIC COMPOSITION BASED ON Ti–Cu SYSTEM

T.V. Melnychenko, A.I. Ustinov, O.Yu. Klepko, O.V. Samofalov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: melnychenko21@ukr.net

The regularities of diffusion bonding of the titanium alloy Ti6-4 through multilayer interlayers of eutectic composition based on Ti–Cu system, produced by electron beam deposition in vacuum, were investigated in this work. The microstructure and mechanical properties of the joints were analyzed using scanning electron microscopy and by determining their shear strength. It is shown that multilayer interlayers provide defect-free joints without degradation of titanium alloy properties at a temperature of 920…950 ºC, corresponding to the melting interval of the interlayer. It is established that the nature of the reaction interaction of the components of the interlayer and Ti6-4 alloy during heating depends on the temperature and melting interval of the multilayer interlayer and determines the microstructure and phase composition of the joint. Absence of continuous layers of intermetallics (TiCu, Ti_2Cu) in the joint and formation of a dispersed Widmanstätten structure with copper and nickel content of < 7 at.% provide the joint strength at the level of the Ti6-4 alloy. 15 Ref., 5 Tabl., 8 Fig.

Keywords: multilayer foil, EB-PVD, Ti6-4 alloy, diffusion bonding, microstructure, shear strength

Отримано 31.07.2024
Отримано у переглянутому вигляді 23.10.2024
Прийнято 26.11.2024

УДК 621.793.7 DOI: https://doi.org/10.37434/as2024.06.02

ПОКРИТТЯ ДЛЯ МЕДИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ, ОТРИМАНЕ МЕТОДОМ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ СПЛАВУ Zr–Nb

С.Ю. Максимов[1], С.Г. Войнарович[1], С.М. Калюжний[1], О.М. Кислиця[1], І.С. Свірідова[1], Д.Л. Алонцева[2], R. Yamanoglu[3]

[1]ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: serge.voy@gmail.com
[2]Східно-Казахстанський технічний університет ім. Д. Серикбаєва. 070004, м. Усть-Каменогорськ, вул. Протозанова, 69, Казахстан.
[3]Department of Metallurgical and Materials Engineering, College of Engineering, Kocaeli University. 41380, Kocaeli, Turkey.
E-mail: ryamanoglu@kocaeli.edu.tr

У роботі розглядається технологія мікроплазмового напилення зі сплаву Zr–Nb біосумісних покриттів та їх властивості. На поверхні пористого Zr–Nb покриття з найбільш розвиненим мікрорельєфом поверхні виявлено присутність як відкритих макропор розміром до 300 мкм, так і мікропор розміром до 10 мкм. Рентгенофазовий аналіз сформованих Zr–Nb покриттів показав наявність фаз α-твердого розчину Zr, оксиду (ZrO_2), нітриду (ZrN) і карбіду ($ZrNbC_2$). Були встановлені показники корозійної стійкості мікроплазмового Zr–Nb покриття та сплаву Ti6Al4V в розчині 0,9 % NaCl, що імітує середовище людського організму. Передбачається, що покриття зі сплаву Zr–Nb, отримані мікроплазмовим напиленням на поверхнях існуючих ендопротезів зі сплаву Ti6Al4V, дозволять у майбутньому підвищити стійкість до корозії та остеоінтеграцію між кісткою та імплантатом. Бібліогр. 26, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: мікроплазмове напилення, біосумісне покриття, сплав Zr–Nb, морфологія поверхні, міцність зчеплення, корозійна стійкість

Вступ. У даний час найбільше застосування у виробництві ортопедичних імплантатів має сплав на основі титану системи легування Ti6Al4V [1]. Проте біоінертність поверхні імплантатів зі сплаву Ti6Al4V негативно впливає на утворення функціонального зв'язку між імплантатом і кісткою [2]. Крім того, довготривала експлуатація імплантатів зі сплаву Ti6Al4V при тісному контакті з кістковими та м'якими оточуючими тканинами людини призводить до вивільнення легуючих елементів, таких як ванадій та алюміній, і прояви патологічних реакцій в організмі. Так, алюміній перешкоджає мінералізації кісток, що призводить до структурного дефіциту, а ванадій проявляє високу цитотоксичність і може викликати алергічні реакції [3].

Оскільки після імплантування поверхня імплантату першою взаємодіє з навколишньою живою тканиною, характеристики поверхні імплантату (такі як її топографія, гідрофільність, шорсткість та ін.) відіграють домінуючу роль як у взаємодії клітин з металевим імплантатом, так і в наступних процесах його остеоінтеграції [4].

Підвищити біосумісність існуючих імплантатів зі сплаву Ti6Al4V можливо завдяки модифікуванню їх поверхні з наданням відповідної функціональності. Таким чином, нанесення на поверхню імплантату покриття є одним із важливих технологічних прийомів для надання поверхні хімічних і фізичних властивостей, які сприятимуть загальному підвищенню біосумісності всього імплантованого виробу. Серед методів, які активно досліджуються та знаходять розповсюдження при нанесенні біосумісних покриттів із порошків та дротів, є мікроплазмове напилення (МПН) [5, 6].

У якості матеріалів для підвищення біосумісності імплантатів все частіше знаходять своє застосування сплави на основі цирконію завдяки таким унікальним властивостям, як: утворення внутрішнього кістковоподібного шару апатиту на їх поверхні в середовищі організму, меншу артефактність при діагностиці за допомогою магнітно-резонансної томографії через низьку магнітну сприятливість, а також їх чудову загальну біосумісність, високі механічні властивості та корозійну стійкість в біологічних рідинах живого організму [7, 8].

Крім хімічного складу покриття, на процес остеінтеграції значний вплив має розвинений рельєф його поверхні, наявність і розмір відкритих пор у покритті [9].

У [10] наведено, що розмір пор більше 100 мкм необхідний для успішного процесу формування

Максимов С.Ю. – https://orcid.org/0000-0002-5788-0753, Войнарович С.Г. – https://orcid.org/0000-0002-4329-9255, Калюжний С.М. – https://orcid.org/0000-0002-8132-3930, Кислиця – О.М. https://orcid.org/0000-0001-8894-4660, Свірідова І.С. – https://orcid.org0009-0005-6302-3423, Алонцева Д.Л. – https://orcid.org/0000-0003-1472-0685, Ridvan Yamanoglu – https://orcid.org//0000-0002-4661-8215
© С.Ю. Максимов, С.Г. Войнарович, С.М. Калюжний, О.М. Кислиця, І.С. Свірідова, Д.Л. Алонцева, R. Yamanoglu, 2024

кісткової тканини, тоді як рекомендований розмір пор повинен бути близько 300 мкм. Подібний розмір пор в діапазоні 200…400 мкм наведено в [11] як такий, що сприяє адгезії, міграції та проліферації остеобластів. Морфологія мікроструктури поверхні також сприяє умовам для адгезії на ній клітин. Встановлено, що мікромасштабна топографія має низку переваг. Так, мікронний розмір відкритих пор може покращити шорсткість і площу поверхні, а також збільшити контакт імплантату з кісткою. Цей ефект взаємодії між імплантатом та кісткою, як показують результати досліджень, здебільшого сприяє остеоінтеграції. Крім того, мікрорівнева топографія може блокувати та стабілізувати фібриновий потік, який може залучати остеопрогеніторні клітини для колонізації на межі між імплантатом і кісткою. Найголовніше, мікромасштабна топографія поверхні здатна покращити початкову адгезію та диференціацію клітин [12].

Так, B.E. Li підтверджує, що мікро- і наношорсткість контактуючої поверхні з кісткою працюють синергетично для підвищення ефективності остеоінтеграції ортопедичних імплантатів [13]. Результати гістологічних досліджень показують, що шорсткіший рельєф поверхні сприяє процесам остеоінтеграції [14].

K. Matsuzaka провів оцінку впливу поверхні імплантату на проліферацію остеобластоподібних клітин і показав, що клітини закріплюються на поверхнях у залежності від їх рельєфу, а переважна їх кількість спостерігалась на виступах понад 5 мкм [15].

Також у [16] вказано, що при збільшенні шорсткості поверхні покриття від R_a = 3,7 мкм до 56,1 мкм з'єднання титанового імплантату з кістковою тканиною підвищується в 4 рази (від 5,38 ± 1,96 до 21,63 ± 2,51 МПа відповідно).

У даний час рекомендована середня шорсткість поверхні для титанових ортопедичних імплантатів знаходиться в широкому діапазоні (0,07…100 мкм) [17], проте систематичне дослідження впливу шорсткості поверхні на біосумісність не проводилося. Автори [17] вказали оптимальний діапазон шорсткості поверхні ортопедичних імплантатів 20…25 мкм. Хоча зростання показника шорсткості й підвищувало адгезію та поліферацію клітин на поверхні зразків зі сплаву Ti13Nb13Zr в їх досліді, але вона також і збільшувала місця із концентрацією напружень, погіршуючи міцність на згин та сприяла утворенню тріщин. У [18] відзначається, що висока шорсткість R_a = 118,19 ± 9,06 мкм поверхні ортопедичних титанових імплантатів може перешкоджати проліферації клітин. Передбачається, що зниження швидкості проліферації клітин на зразках-основах із підвищеною шорсткістю може бути результатом несприятливої біологічної реакції на підвищену взаємодію з титаном. Таким чином, погана остеоінтеграція титанових імплантатів може бути обумовлена впливом титана на навколишні тканини.

У літературних джерелах представлені різні підходи щодо вибору оптимального діапазону шорсткості поверхні ортопедичних імплантатів. Відповідно із застосуванням рекомендованих значень шорсткості в майбутньому необхідно буде дослідити отримані поверхні на біосумісність.

Метою даної роботи є дослідження елементного складу поверхні покриття, нанесеного методом мікроплазмового напилення дроту сплаву Zr–Nb на основу зі сплаву Ti6Al4V, її топографії, показника корозійної стійкості в середовищі, подібному до людського організму, та міцності зчеплення з основою.

Матеріали, обладнання та методики проведення експерименту. Формування покриттів сплаву Zr–Nb із дроту діаметром 0,3 мм проводили на комплексі обладнання для мікроплазмового напилення МПН-004 [19] на зразки зі сплаву Ti6Al4V.

Попередньо в результаті проведеного аналізу розрахованої швидкості подачі дроту зі сплаву Zr–Nb, необхідної кількості теплоти мікроплазмового струменя, практичного досвіду в отриманні біосумісних покриттів на установці МПН-004 були визначені граничні значення параметрів режиму МПН (табл. 1) для подальшого дослідження їхнього впливу на процес формування біосумісних покриттів зі сплаву Zr–Nb.

При визначенні граничних значень технологічних параметрів МПН було враховано, що при струмі нижче 16 А і витраті плазмоутворюючого газу менше 160 л/год теплових і газодинамічних характеристик струменя буде недостатньо для забезпечення процесу плавлення Zr–Nb дроту діаметром 0,3 мм зі стабільним його диспергування [19]. Тому критерії граничних значень параметрів режиму підбиралися також з урахуванням можливості забезпечення процесу як розпилення, так і формування покриття.

Рентгенофазові дослідження та хімічний аналіз проводили на дифрактометрі D8 ADVANCE

Таблиця 1. Граничні значення досліджуваних параметрів процесу МПН Zr–Nb покриттів

Параметри	max (+)	min (–)
Струм I, А	26	16
Витрата плазмоутворюючого газу $Q_{пл}$, л/год	240	160
Дистанція напилення H, мм	120	40
Швидкість подачі дроту $V_{др}$, м/хв	4,8	2,9

Bruker (Bruker, США). Покриття сканувалися при параметрах напруги 30 кВ і при збільшенні ×200.

Морфологію поверхні сформованих покриттів вивчали за допомогою аналізу отриманих зображень на Philips SEM515 при використанні датчиків BE+SE, напруги прискорення 20 кВ і струму нагріву електрода 40 мА.

Фотографії 3D профілів поверхонь покриттів були отримані за допомогою оптичного профілометра Huvitz HDS-2520 (Gyeonggi, Республіка Корея) з роздільною здатністю ±0,1 мкм при оптичному збільшенні ×5, ×20 і ×50. Площа сканування для кожного вимірювання обиралася випадковим чином, щоб забезпечити відтворюваність вимірювань, і становила приблизно 700×500 мкм^2. Параметри шорсткості по площі були обрані через те, що вони дають інформативніші значення, ніж параметри лінії.

Вивчення 3D топографії поверхні та параметру шорсткості поверхні покриттів по площі 2D карт було проведено за допомогою програмного забезпечення Mountains® 9 (Digital Surf, Безансон, Франція). Середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості поверхні (S_a) покриттів було визначено в межах стандартного відхилення ± 0,1 мкм відповідно до ISO 25178-2:2021.

Корозійну стійкість покриттів на зразках розміром 20×15×2 мм було досліджено впродовж 1 год у концентрованому розчині 0,9 % NaCl із близькою концентрацією іонів до плазми крові людини. У конфігурації електричної схеми досліджувані зразки виступали як робочі електроди, тоді як електродом порівняння був платиновий електрод. Значення екстраполяції Тафеля були застосовані для визначення густини струму корозії ($I_{корр}$) і потенціалу корозії ($E_{корр}$). Поляризаційні криві отримували в розчині 0,9 % NaCl при 20 ºС в діапазоні напруги –250...+250 мВ і швидкості сканування 1 мВ/с.

Міцність зчеплення покриття з основою визначали, застосовуючи метод статичного одновісного розтягу згідно з ASTM C633-13:2021. Кількість досліджуваних зразків з покриттям була не менше 5 шт. Випробування на розтяг кожного комплекту склеєних збірок зразків проводили на універсальній механічній машині 2054 Р-5 (НПК ТехМаш) при однаковій швидкості навантаження 2 мм/хв.

Результати досліджень та їх обговорення. Дослідження хімічного складу поверхні Zr–Nb покриттів (табл. 2) показало, що вони подібні вихідному матеріалу, до складу якого входить Zr, середнє значення якого складає біля 97,6 ± 0,82 ат. % і Nb 2 ± 0,3 ат. %, що відповідає промисловому цирконієвому сплаву марки КТЦ-125. Також фіксувалася незначна кількість Al і Ca, вміст яких становив менше 1 ат. %, що можна вважати домішками в складі сплаву Zr–Nb.

Рентгенофазові дослідження Zr–Nb дроту та поверхонь зразків із покриттям представлені у вигляді рентгенограм (рис. 1).

При порівнянні рентгенограм виявлено, що повне розплавлення в мікроплазмовому струмені Zr–Nb дроту та наступне охолодження диспергованих частинок на поверхні основи призводить до формування покриттів, що складаються із α-твер-

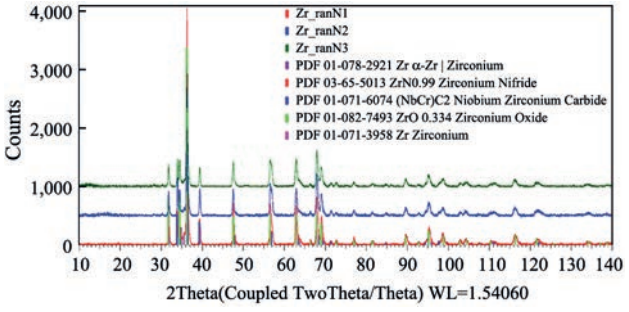
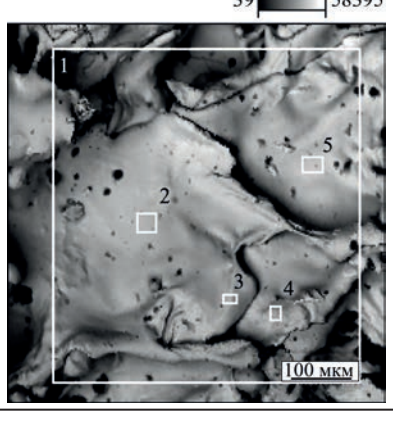


Рис. 1. Рентгенограма Zr-Nb покриттів при параметрах МПН: режим 1 – I = 26 А, $Q_{пл}$ = 240 л/год, H = 120 мм, $V_{др}$ = 4,8 м/хв; режим 2 – I = 26 А, $Q_{пл}$ = 160 л/год, H = 40 мм, $V_{др}$ = 4,8 м/хв; режим 3 – I = 16 А, $Q_{пл}$ = 160 л/год, H = 40 мм, $V_{др}$ = 2,9 м/хв

Таблиця 2. Хімічний склад поверхні Zr–Nb покриття, отриманого при параметрах МПН I = 16 А; $Q_{пл}$ = 160 л/год; H = 40 мм; $V_{др}$ = 2,9 м/хв



Область сканування	Вміст хімічних елементів, ат. %			
	Al	Ca	Zr	Nb
1	0,4	0,3	97,2 ± 0,9	2,1 ± 0,3
2	0,2	–	98,1 ± 0,8	1,7 ± 0,3
3	0,2	–	97,5 ± 0,8	2,3 ± 0,3
4	0,3	0,4 ± 0,1	97,5 ± 0,8	1,8 ± 0,3
5	0,2	–	97,7 ± 0,8	2,1 ± 0,3

дого розчину Zr із присутністю включень: оксиду ZrO_2, нітриду ZrN і карбіду $ZrNbC_2$.

Інтенсивність піків на рентгенограмі та подібність виявлених фаз від варіювання параметрів режиму МПН не змінюється і спостерігається на всіх зразках із покриттям. За вмістом включень у покритті переважає фаза ZrO_2, яка в подальшому буде виступати як інгібітор швидкості розчинення покриття при контакті з оточуючими рідинами людського організму. Виявлена фаза ZrN свідчить про насиченість азотом розпилених частинок при русі в мікроплазмовому струмені за температур 670 К. Це вказує на те, що захисту у вигляді обдуву струменем технологічного газу аргону мікроплазмового потоку із розпиленими частинками Zr недостатньо для ефективного відокремлення їх від атмосферних газів при формуванні покриттів. Присутні включення $ZrNbC_2$ у біосумісних покриттях можуть посприяти підвищенню твердості даних покриттів, але в той же час знизити їх пластичність і міцність зчеплення з основою, як і включення оксидів і нітридів.

Відомо, що як на розмір і вміст пор в об'ємі структури Zr–Nb покриттів, так і на мікрорельєф їх поверхневих шарів впливають стан і деформації диспергованих частинок, які формують покриття, що в свою чергу визначається параметрами режиму МПН [20]. Вміст об'ємної пористості в структурі Zr–Nb покриттів знаходився в межах значень (2,8 ± 0,1)…(20,3 ± 2,0) %, тоді як найбільший вміст об'ємної пористості в Zr–Nb покритті формувався на режимі із параметрами I = 16 А; $Q_{пл}$ = = 160 л/год; H = 40 мм; $V_{др}$ = 2,9 м/хв [20].

Дослідження морфології поверхонь Zr–Nb покриттів (рис. 2.) продемонструвало, що вона характеризується неоднорідністю з безліччю поверхневих розгалужень у вигляді впадин і виступів та відкритих макропор розміром до 300 ± 50 мкм. Завдяки диспергованим частинкам, котрі були повністю розплавлені, формувалися Zr–Nb покриття із дископодібних сплетів. Через наявність залишкового напруження в сплетах поверхня Zr–Nb покриттів мала мікротріщини, які утворювалися через швидкі процеси теплообміну та охолодження. Утворені тріщини призводять до релаксації напружень, що виникають у покритті, у той час як сама пористість може бути способом для зниження модуля пружності покриття та наближення його до кісткового, але вона також є небезпечним фактором, який посилює процес деструкції на межі розділу покриття та основи [21].

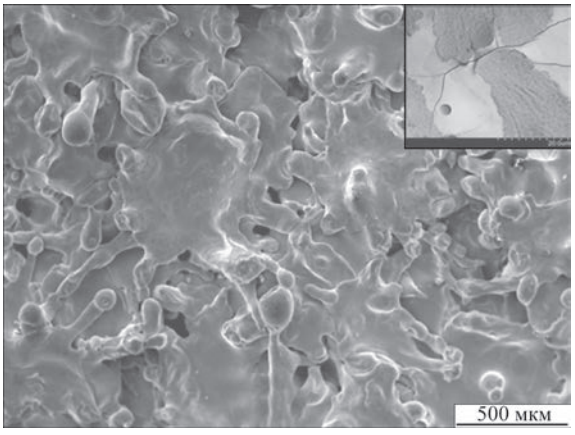


Рис. 2. СЕМ морфологія поверхні Zr–Nb покриття, отримана при параметрах МПН I = 16 А; $Q_{пл}$ = 160 л/год; H = 40 мм; $V_{др}$ = 2,9 м/хв

Поверхні Zr–Nb покриттів з найбільш вираженим мікрорельєфом мали шорсткість S_a = 17 ± 0,1 мкм (рис. 3).

Подібний показник шорсткості поверхні, який сприяє процесам остеоінтеграції, було отримано в [22] для біосумісного титанового покриття.

Дослідження морфології поверхонь Zr–Nb покриттів виявили не тільки відкриті макропори розміром до 300 мкм, а й також мікропори розміром до 10 мкм, які знаходилися на вершинах виступів покриття, що утворені із частково деформованих диспергованих частинок з Zr–Nb дроту (рис. 4).

Отримані результати виявленої шорсткості та пористості, згідно з літературними даними, дозволять забезпечити підвищення біосумісності поверхні по-

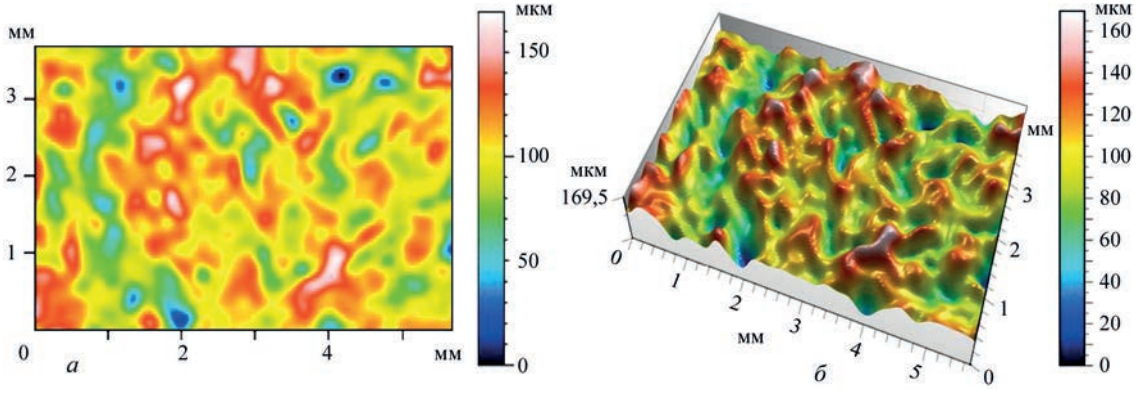


Рис. 3. 2D *(а)* і 3D *(б)* топографія мікрорельєфу поверхні Zr-Nb покриття, отриманого при параметрах МПН I = 16 А; $Q_{пл}$ = 160 л/год; H = 40 мм; $V_{др}$ = 2,9 м/хв

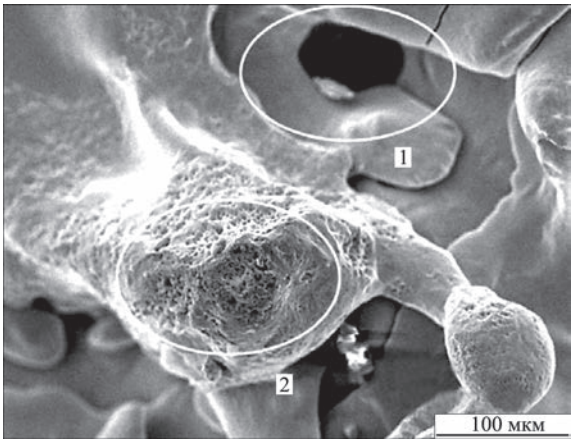


Рис. 4. Морфологія поверхні із макро- (1), мікро- (2) порами Zr-Nb покриття, сформованого при параметрах МПН I = 16 А; $Q_{пл}$ = 160 л/год; H = 40 мм; $V_{др}$ = 2,9 м/хв

криття та міцніше з'єднання кістка-імплантат завдяки наявності місць для закріплення кісткового матриксу та прискорення процесу остеоінтеграції [23].

Проведені дослідження міцності зчеплення покриттів зі сплаву Zr–Nb, нанесених на поверхню зразків зі сплаву Ti6Al4V, показали, що її середнє значення для покриттів завтовшки 300 ± 10 мкм із вмістом об'ємних пор 20,3 ± 2,0 % склало 26 ± 2,1 МПа. Оскільки на сьогодні немає стандарту, який визначає необхідну величину міцності зчеплення біосумісних Zr–Nb покриттів із пористою структурою з поверхнею імплантатів, то їх порівняння було виконано згідно із встановленою вимогою в міжнародному стандарту якості ISO 13179-1:2021 для пористих титанових покриттів, отриманих плазмовим напиленням на поверхні зі сплаву Ti6Al4V. Відповідно до вимоги ISO 13179-1:2021 середнє значення міцності зчеплення біосумісного покриття на відрив має становити понад 22 МПа. Тому встановлене зчеплення 26 ± 2,1 МПа, що характеризує міцність зчеплення Zr-Nb покриття з основою зі сплаву Ti6Al4V, задовольняє вимогам ISO 13179-1:2021.

Результати досліджень корозійної стійкості Zr–Nb покриття, отриманого методом МПН та зі сплаву Ti6Al4V основи після газоабразивної обробки, представлені у вигляді поляризаційних діаграм (рис. 5).

Із аналізу поляризаційних кривих було виявлено, що плато потенціалу корозії Zr–Nb покриття було біля 216 мВ і знаходилося в більш позитивній області значень, ніж для основи зі сплаву Ti6Al4V, яке становило 310 мВ. Таким чином, корозійна стійкість зразка з Zr–Nb покриттям була вища порівняно зі сплавом Ti6Al4V, що пояснюється наявністю захисного поверхневого оксидного шару ZrO_2, який знижує швидкість корозії шляхом мінімізації вивільнення іонів у біосередовище та сприяє процесу остеоінтеграції. На основі цих характеристик цирконій та його сплави були запропоновані як кандидати для постійних імплантатів [24].

Також підвищеному механізму корозійної стійкості сприяє плівка оксиду ніобію (Nb_2O_5), яка формується по границях кристалів двооксиду цирконію та сприяє «заліковуванню» дефектів захисної оксидної плівки цирконію [25].

Для всіх досліджуваних зразків Zr–Nb покриття і зразків основи зі сплаву Ti6Al4V анодний нахил кривої був подібним до катодного нахилу кривої на поляризаційній діаграмі, що свідчить про те, що кінетика перенесу електронів як для анодної, так і для катодної складової є однаковою для обох випадків. Менший показник густини струму корозії на зразках з Zr–Nb покриттям (рис. 5, *а*) вказує на значно нижчу швидкість протікання процесу корозії, що підтверджує кращу ефективність захисту поверхневого шару оксидною плівкою ZrO_2. Аналогічні результати наведені в [26] на прикладі захисту поверхонь магнієвих сплавів від корозії в середовищі людського організму, де оксидна плівка ZrO_2 визнана ефективнішою, ніж TiO_2.

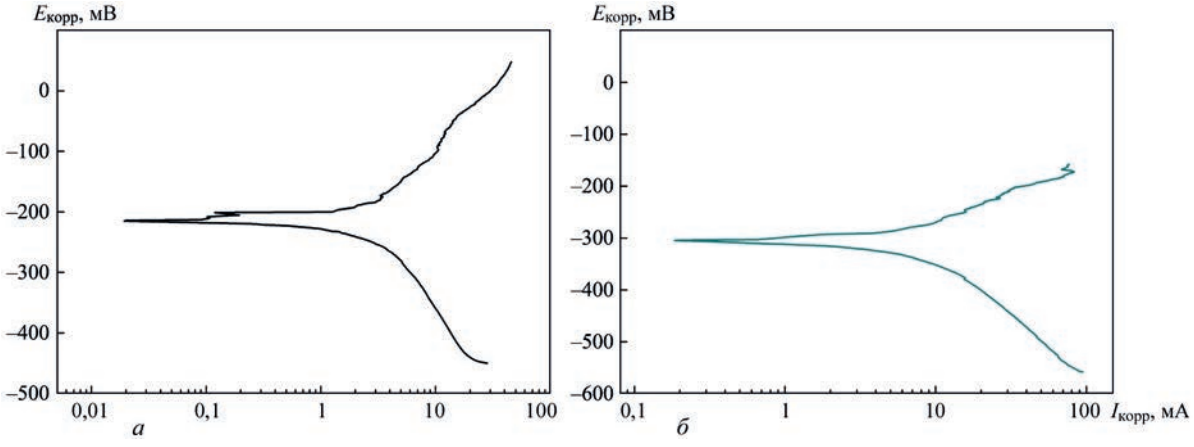


Рис. 5. Поляризаційні діаграми залежності анодної густини струму корозії зразків з Zr–Nb покриттям (*а*) та зразків основи зі сплаву Ti6Al4V (*б*)

З отриманих результатів корозійної поведінки досліджуваних зразків та їх аналізу було встановлено, що біосумісні Zr–Nb покриття, отримані методом МПН, дозволять значно ефективніше протистояти корозії в біологічних розчинах і підвищити корозійну стійкість сплаву Ti6Al4V, який в теперішній час найбільш поширено використовується при виготовлені імплантатів.

Висновки

1. Визначено, що, застосовуючи метод мікроплазмового напилення на режимі з параметрами I = 16 А, $Q_{пл}$ = 160 л/год, H = 40 мм, $V_{др}$ = 2,9 м/хв, забезпечується формування Zr–Nb покриття з найбільш розвиненим мікрорельєфом із шорсткістю S_a = 17 ± 0,1 мкм. Крім того, на поверхні пористого Zr–Nb покриття виявлено присутність як макропор розміром до 300 мкм, так і мікропор розміром до 10 мкм.

2. Рентенофазові дослідження Zr–Nb покриттів показали, що вони складаються із α-твердого розчину Zr із присутністю включень: оксиду (ZrO_2 – переважаюча кількість), нітриду (ZrN), карбіду ($ZrNbC_2$).

3. Отримані показники корозійної стійкості зразків покриття із Zr–Nb сплаву в розчині 0,9 % NaCl показали, що плато потенціалу корозії покриття знаходилося в позитивнішій області значень, ніж для зразків із Ti6Al4V сплаву, що передбачає утворення пасивуючого шару, який є захисним бар'єром від корозії. Менший показник густини струму корозії на зразках Zr–Nb покриття свідчить про їх вищу електрохімічну стійкість до корозії і вказує на значно нижчу швидкість протікання процесу корозії, що підтверджує кращу ефективність захисту поверхневого шару оксидною плівкою ZrO_2.

4. У результаті поведених досліджень міцності зчеплення Zr–Nb покриттів завтовшки 300 ± 10 мкм із пористою структурою (вміст пор становив 20,3 ± 2,0 % в об'ємі покриття) з поверхнею зразків із Ti6Al4V сплаву отримано середнє значення міцності зчеплення 26 ± 2,1 МПа, що задовольняє вимогам ISO 13179-1:2021 (понад 22 МПа) та дозволяє використовувати їх відповідно до вимог біосумісних титанових покриттів на поверхнях імплантатів.

Опубліковані результати отримані в рамках реалізації проєкту № 183/0070 від 01.08.2024 «Розробка інноваційних біосумісних антибактеріальних покриттів та технології їх нанесення на ортопедичні імплантати для застосування при лікуванні травм у військовослужбовців та цивільних громадян» за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу «Наука для зміцнення обороноздатності України».

Список літератури/References

1. Abd-Elaziem, W., Darwish, M.A., Hamada, A., Daoush, W.M. (2024) Titanium-based alloys and composites for orthopaedic implants applications: A comprehensive review. *Materials & Design,* **241**, 112850. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112850
2. Quinn, J., McFadden, R., Chan, C.-W., Carson, L. (2020) Titanium for orthopaedic applications: An overview of surface modification to improve biocompatibility and prevent bacterial biofilm formation. *Science*, 23(**11**), 101745. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101745
3. Tepla, T., Pleshakov, E., Sieniawski, J., Bohun, L. (2022) Causes of degradation of titanium dental implants. *Ukrainian J. of Mechanical Engineering and Mater. Sci.*, 8(**4**), 31–40. DOI: https://doi.org/10.23939/ujmems2022.04.031
4. Wang, H., Liu, J., Wang, C. et al. (2020) The synergistic effect of 3D-printed microscale roughness surface and nanoscale feature on enhancing osteogenic differentiation and rapid osseointegration. *J. of Mater. Sci. & Technology*, **63**, 18–26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.12.030
5. Alontseva, D.L., Ghassemieh, E., Voinarovych, S. et al. (2019) Characterisation of the microplasma spraying of biocompatible coating of titanium. *J. of Microscopy*, 279(**3**), 148–157. DOI: https://doi.org/10.1111/jmi.12849
6. Woźniak, A., Staszuk, M., Reimann, Ł. et al. (2021) The influence of plasma-sprayed coatings on surface properties and corrosion resistance of 316L stainless steel for possible implant application. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(**4**), 148. DOI: https://doi.org/10.1007/s43452-021-00297-1
7. Mehjabeen, A., Song, T., Xu, W. et al. (2018) Zirconium alloys for orthopaedic and dental applications. *Advanced Engineering Materials*, 20(**9**), 1800207. DOI: https://doi.org/10.1002/adem.201800207
8. Zhou, F.Y., Wang, B.L., Qiu, K.J. et al. (2012) Microstructure, mechanical property, corrosion behavior, andin vitrobiocompatibility of Zr–Mo alloys. *J. of Biomedical Materials Research Pt B: Applied Biomaterials*, 101B(**2**), 237–246. DOI: https://doi.org/10.1002/jbm.b.32833
9. Stich, T., Alagboso, F., Křenek, T. et al. (2021) Implant-bone-interface: reviewing the impact of titanium surface modifications on osteogenic processes in vitro and in vivo. *Bioengineering & Translational Medicine*, **7**, e10239. DOI: https://doi.org/10.1002/btm2.10239
10. Cheikho, K., Laurent, C., Ganghoffer, J.F. (2022) An advanced method to design graded cylindrical scaffolds with versatile effective cross-sectional mechanical properties. *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **125**, 104887. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104887
11. Wang, R., Ni, S., Ma, L., Li, M. (2022) Porous construction and surface modification of titanium-based materials for osteogenesis: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, 973297. DOI: https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.973297
12. Wang, H., Liu, J., Wang, C. et al. (2020) The synergistic effect of 3D-printed microscale roughness surface and nanoscale feature on enhancing osteogenic differentiation and rapid osseointegration. *J. of Mater. Sci. & Technol.*, **63**, 18–26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.12.030
13. Li, B.E., Li, Y., Min, Y. et al. (2015) Synergistic effects of hierarchical hybrid micro/nanostructures on the biological properties of titanium orthopaedic implants. *RSC Advances*, 5(**61**), 49552–49558. DOI: https://doi.org/10.1039/c5ra05821j
14. Cheng, B., Niu, Q., Cui, Y. et al. (2017) Effects of different hierarchical hybrid micro/nanostructure surfaces on implant osseointegration. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 19(**3**), 539–548. DOI: https://doi.org/10.1111/cid.12471
15. Matsuzaka, K., Frank Walboomers, X., Yoshinari, M. et al. (2003) The attachment and growth behavior of osteoblast-like cells on microtextured surfaces. *Biomaterials*, 24(**16**), 2711–2719. DOI: https://doi.org/10.1016/s0142-9612(03)00085-1

16. Nakashima, Y., Hayashi, K., Inadome, T. et al. (1997) Hydroxyapatite-coating on titanium arc sprayed titanium implants. *J. of Biomedical Materials Research*, 35(**3**), 287–298. DOI: https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4636(19970605)35:3%3C287::aid-jbm3%3E3.0.co;2-d
17. Jahani, B. (2021). The effects of surface roughness on the functionality of Ti13Nb13Zr orthopedic implants. *Biomedical J. of Scientific & Technical Research*, 38(**1**), 30058–30067. DOI: https://doi.org/10.26717/bjstr.2021.38.006104
18. Lewallen, E.A., Trousdale, W.H., Thaler, R. et al. (2021) Surface roughness of titanium orthopaedic implants alters the biological phenotype of human mesenchymal stromal cells. *Tissue Engineering Pt A*, **27**, 1503–1516. DOI: https://doi.org/10.1089/ten.tea.2020.0369
19. Borisov, Yu.S., Kislitsa, A.N., Vojnarovich, S.G. (2006) Peculiarities of the process of microplasma wire spraying. *The Paton Welding J.*, **4**, 21–25.
20. Voinarovych, S.G., Alontseva, D.L., Kyslytsia, O.N. et al. (2021) Fabrication and characterization of Zr microplasma sprayed coatings for medical applications. *Advances in Mater. Sci.*, 21(**2**), 93–105. DOI: https://doi.org/10.2478/adms-2021-0013
21. Fousova, M., Vojtech, D., Jablonska, E. et al. (2017) Novel approach in the use of plasma spray: Preparation of bulk titanium for bone augmentations. *Materials*, 10(**9**), 987. DOI: https://doi.org/10.3390/ma10090987
22. Alontseva, D., Ghassemieh, E., Voinarovych, S. et al. (2020) Manufacturing and characterisation of robot assisted microplasma multilayer coating of titanium implants: biocompatible coatings for medical implants with improved density and crystallinity. *Johnson Matthey Technology Review*, 64(**2**), 180–191. DOI: https://doi.org/10.1595/205651320x15737283268284
23. Cheikho, K., Laurent, C., Ganghoffer, J.F. (2022) An advanced method to design graded cylindrical scaffolds with versatile effective cross-sectional mechanical properties. *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **125**, 104887. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104887
24. Rosalbino, F., Macciò, D., Scavino, G. (2023) Corrosion behaviour of Zr–Ag alloys for dental implant application. *Mater. Sci. and Applications*, 14(**11**), 501–514. DOI: https://doi.org/10.4236/msa.2023.1411033
25. Кириченко В.Г. (2015). *Ядерно-физическое металловедение сплавов атомной энергетики*. Глава 1. Харьков, ХНУ им. В.Н. Каразина.
Kirichenko, V.G. (2015) *Nuclear physics of metal sciences of power engineering alloys.* Chapt. 1, Kharkiv, KhNU [in Russian].
26. Peron, M., Bertolini, R., Cogo, S. (2022) On the corrosion, stress corrosion and cytocompatibility performances of ALD TiO_2 and ZrO_2 coated magnesium alloys. *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **125**, 104945. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104945

COATING FOR MEDICAL APPLICATION PRODUCED BY MICROPLASMA SPRAYING FROM Zr-Nb ALLOY

S.Yu. Maksymov[1], S.G. Voinarovych[1], S.N. Kaliuzhnyi[1], O.N. Kyslytsia[1], I.S. Sviridova[1], D.L. Alontseva[2], R.Yamanoglu[3]

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

[2]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. 69 Protosanov Str., 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

[3]Department of Metallurgical and Materials Engineering, College of Engineering, Kocaeli University, Kocaeli 41380, Turkey.
E-mail: ryamanoglu@kocaeli.edu.tr

The work deals with the technology of microplasma spraying of biocompatible coatings from Zr-Nb alloy and their properties. On the surface of the porous Zr-Nb coating with the most developed surface microrelief, the presence of both open macropores of up to 300 μm in size and micropores of up to 10 μm in size was revealed. The X-ray phase analysis of the formed Zr-Nb coatings showed the presence of phases of α-solid solution of Zr, oxide (ZrO_2), nitride (ZrN) and carbide ($ZrNbC_2$). The corrosion resistance of the microplasma Zr-Nb coating and Ti6Al4V alloy in a solution of 0.9 % NaCl, which simulates the environment of the human body, was determined. It is assumed that the Zr-Nb alloy coatings produced by microplasma spraying on the surfaces of existing Ti6Al4V endoprostheses will allow for future improvement of corrosion resistance and osseointegration between the bone and the implant. 26 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: microplasma spraying, biocompatible coating, Zr-Nb alloy, surface morphology, adhesion strength, corrosion resistance

Отримано 09.09.2024
Отримано у переглянутому вигляді 29.10.2024
Прийнято 13.12.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., **6** випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1975 р., **4** випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., **4** випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., **12** випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.
** 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 каталогам передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр», «Меркурій» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любий 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.
На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

Адреса видавництва
Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com

УДК 621.791.052.4:539.4.013.3 DOI: https://doi.org/10.37434/as2024.06.03

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ТОНКОЛИСТОВИХ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ З УРАХУВАННЯМ ПОЧАТКОВОЇ КУТОВОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

А.В. Молтасов, П.М. Ткач, М.М. Димань, І.Г. Ткач, В.Г. Кот

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

Стаття присвячена дослідженням впливу початкової кутової деформації, зумовленої нерівномірним поперечним осіданням стикового зварного шва в процесі його охолодження, на коефіцієнти концентрації напружень (ККН) в зонах переходу від лицьового підсилення та кореня шва до основного металу (ОМ). Проведено аналіз наявних формул для визначення коефіцієнта, який враховує вплив початкової кутової деформації на ККН на лінії сплавлення шва з ОМ. У результаті встановлено, що ці формули розроблені для з'єднань із симетричним відносно серединної площини зварюваних пластин стиковим швом і не можуть використовуватись при розрахунках поблизу кореня шва. Приведене теоретичне обґрунтування того, що початкова кутова деформація повинна призводити до зниження напружень на кореневій стороні з'єднання. Запропоновано нові аналітичні формули для визначення ККН на лінії сплавлення кореня шва з ОМ, які враховують початкову кутову деформацію. На конкретному прикладі було показано, що наявність початкової кутової деформації призводить до зниження напружень на кореневій стороні з'єднання. Результати аналітичних розрахунків були підтверджені чисельними розрахунками методом скінченних елементів. Бібліогр. 18, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: стикове зварне з'єднання, кутова деформація, концентрація напружень, розтягування, згинання, корінь зварного шва

Вступ. При зварюванні плавленням стикових швів без розробки або з V-подібною розробкою кромок кількість розплавленого металу збільшується від зворотної до лицьової сторони з'єднання, що спричиняє нерівномірне поперечне осідання по товщині з'єднуваних пластин при охолодженні [1]. Внаслідок цього паралельні до зварювання частини з'єднання повертаються одна відносно іншої на кут γ, утворюючи кут між лицьовими поверхнями < 180º (рис. 1).

Такі відхилення геометричної форми призводять до збільшення напружень у зварних з'єднаннях при їх осьовому навантаженні внаслідок виникнення додаткових напружень згину [2]. Показано [3], що відхилення геометричної форми, які виникають в процесі зварювання, чинять помітний негативний вплив на втомну довговічність, особливо для тонколистових конструкцій з малою жорсткістю на згин.

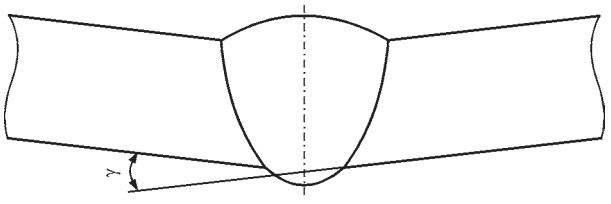


Рис. 1. Кутове переміщення внаслідок нерівномірного поперечного осідання металу в процесі формування стикового зварного шва

Оскільки концентрація напружень є одним з основних факторів, які визначають опір втомі зварних з'єднань [4], обґрунтування методики щодо правильної оцінки впливу початкової кутової деформації на коефіцієнти концентрації напружень (ККН) в зонах переходу від конструктивних елементів стикового шва до основного металу (ОМ) є актуальною науково-технічною задачею в області міцності, надійності та довговічності зварних конструкцій.

Аналіз існуючих підходів та сучасних розрахунків. З урахуванням поступальних і кутових взаємних переміщень зварюваних пластин при формуванні стикового з'єднання узагальнена формула для визначення теоретичного ККН має вигляд [5]:

$$\alpha_\sigma = \alpha_{\sigma w} \cdot \alpha_m \cdot \alpha_\gamma , \qquad (1)$$

де $\alpha_{\sigma w}$, α_m та α_γ – ККН від форми шва, поперечного зміщення зварюваних кромок та кутової деформації відповідно.

Для визначення коефіцієнта α_γ у з'єднаннях із симетричним відносно серединної поверхні з'єднуваних пластин швом в [6] запропоновано формулу:

Молтасов А.В. – https://orcid.org/0000-0002-5025-4055, Ткач П.М. – https://orcid.org/0000-0002-1069-4128,
Димань М.М. – https://orcid.org/0000-0002-5886-1124, Кот В.Г. – https://orcid.org/0000-0002-4759-9992,
Ткач І.Г. – https://orcid.org/0009-0007-1026-9205
©А.В. Молтасов, П.М. Ткач, М.М. Димань, І.Г. Ткач, В.Г. Кот, 2024

$$\alpha_\gamma = 1 + \frac{3l}{\delta}\sin\gamma, \qquad (2)$$

де $l/2$ – відстань від кромки шва до точки прикладення осьового навантаження P; δ – товщина пластин, що з'єднуються (рис. 2).

Згідно з рекомендаціями Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) [7] для визначення α_γ використовують формулу:

$$\alpha_\gamma = 1 + \frac{3l\cdot\gamma}{\delta}\frac{\tanh(\beta)}{\beta}, \qquad (3)$$

де нелінійний множник, залежний від β, враховує ефект зменшення початкового кута γ внаслідок вертикального переміщення перерізу, до якого прикладено осьову силу [8].

Зважаючи на те, що кут зазвичай не перевищує 5° [9], можна з точністю до четвертого знаку прийняти $\sin\gamma \approx \gamma$. Отже, без урахування ефекту випрямлення формули (2) та (3) можна вважати тотожними.

Розглянувши рис. 2, легко побачити, що внаслідок кутової деформації під дією осьової сили P також виникає згинальний момент M_γ, який на лінії сплавлення металу шва (МШ) з ОМ визначатиметься формулою:

$$M_\gamma^f = \frac{P\cdot l}{2}\sin\gamma. \qquad (4)$$

Тоді напруження розтягу від дії осьової сили в перерізі, який відповідає лінії сплавлення, становлять:

$$\sigma^T = \frac{P}{b\cdot\delta},$$

а напруження згину в цьому перерізі від дії згинального моменту:

$$\sigma^B = \frac{3P\cdot l}{b\cdot\delta^2}\sin\gamma,$$

де b – ширина пластин, що з'єднуються.

Отже, сумарне напруження на верхній стороні з'єднання визначатиметься як сума напружень розтягу та згину:

$$\sigma^\Sigma = \frac{P}{b\cdot\delta}\left(1 + \frac{3l}{\delta}\sin\gamma\right). \qquad (5)$$

Як бачимо, в дужках формули (5) маємо коефіцієнт α_γ з формули (2).

Оскільки в [6] розглядався симетричний шов, напруження на нижній стороні з'єднання лишилися поза увагою, тому що очевидно, що вони являтимуть собою різницю напружень розтягу та згину (див. епюру на рис. 2) і будуть меншими за напруження на верхній стороні. При цьому в [10, 11] при розрахунках ККН на кореневій стороні з'єднань, виконаних одностороннім зварюванням, ККН від форми шва також множився на ККН від кутової деформації, внаслідок чого сумарний ККН збільшувався, хоча насправді початкова кутова деформація має призводити до його зменшення поблизу кореня шва.

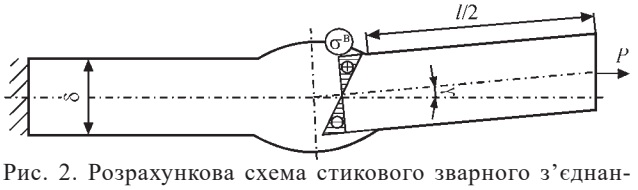


Рис. 2. Розрахункова схема стикового зварного з'єднання з симетричним підсиленням та початковою кутовою деформацією

Відомо [12, 13], що як при статичних, так і при циклічних навантаженнях руйнування тонколистових зварних з'єднань розпочинається саме в зонах переходу від кореня шва до ОМ, тому необхідно кількісно врахувати вплив початкової кутової деформації на величину напружень в цих зонах.

Теоретичні основи визначення ККН поблизу кореня шва. Згідно з даними [14] згинальний момент, зумовлений ексцентриситетом прикладення осьового навантаження на ділянці зі швом, на лінії сплавлення кореня шва з ОМ у стиковому з'єднанні без початкової кутової деформації (рис. 3) буде визначатися формулою:

$$M_e = \frac{P}{2}\left(h_f - R_f + \sqrt{R_f^2 - \frac{g_r^2}{4}}\right), \qquad (6)$$

де h_f – висота лицьового підсилення; R_f – радіус опуклої частини лицьового підсилення; g_r – ширина кореня шва.

Враховуючи відстань між лініями сплавлення лицьового підсилення та кореня шва з ОМ, яка складає $(g_f - g_r)/2$ (див. рис. 3), згинальний момент від початкової кутової деформації на лінії сплавлення кореня шва з ОМ визначатиметься формулою:

$$M_\gamma^r = \frac{P\cdot\left(l + g_f - g_r\right)}{2}\sin\gamma, \qquad (7)$$

де g_f – ширина лицьового підсилення.

Оскільки напрямок дії згинального моменту, пов'язаного з початковою кутовою деформацією,

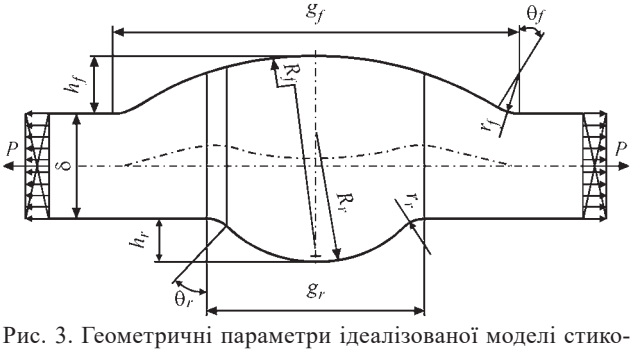


Рис. 3. Геометричні параметри ідеалізованої моделі стикового з'єднання, виконаного одностороннім зварюванням плавленням

є протилежним до напрямку дії моменту, зумовленого ексцентриситетом, остаточний момент на лінії сплавлення кореня шва з ОМ визначається як різниця моментів (6) та (7):

$$M = M_e - M_\gamma^r = \\ = \frac{P}{2}\left[h_f - R_f + \sqrt{R_f^2 - \frac{g_r^2}{4}} - \left(l + g_f - g_r\right)\cdot\sin\gamma\right], \quad (8)$$

Якщо покласти:

$$m = \delta + h_f - R_f + \sqrt{R_f^2 - \frac{g_r^2}{4}},$$

то напруження від згину на лінії сплавлення кореня шва з ОМ для з'єднання одиничної ширини згідно з [14] при $b_0 \le \delta/2$ визначається за формулою:

$$\sigma_r^B = \frac{M\cdot m}{2r_r\left[\left(r_r + \frac{m}{2}\right)^2 \ln\frac{r_r + b_0}{r_r} - b_0\cdot\left(r_r + m\right) + \frac{b_0^2}{2} + \frac{m^3 + \left(m - 2b_0\right)^3}{24\left(r_r + b_0\right)}\right]}, \quad (9)$$

а при $b_0 > \delta/2$ – за формулою:

$$\sigma_r^B = \frac{M\cdot m}{2r_r\left[\left(r_r + \frac{m}{2}\right)^2 \ln\frac{2r_r + m}{2r_r} - \frac{m}{2}\cdot\left(r_r + m\right) + \frac{m^2}{8} + \frac{m^3}{12\left(2r_r + m\right)}\right]}, \quad (10)$$

де r_r – радіус дуги переходу від кореня шва до ОМ; b_0 – параметр, який характеризує гостроту концентратора поблизу кореня шва і визначається за формулою:

$$b_0 = 4\sqrt{2}\,\frac{r_r\cdot h_r}{\sqrt{g_r^2 + 4h_r^2}},$$

де h_r – висота кореня шва.

Підставивши вираз для згинального моменту (8) у (9) та (10), отримаємо формули для визначення напружень згину на лінії сплавлення кореня шва з ОМ у з'єднані з початковою кутовою деформацією відповідно при $b_0 \le \delta/2$:

$$\sigma_r^B = \frac{P\cdot\left[m - \delta - \left(l + g_f - g_r\right)\cdot\sin\gamma\right]\cdot m}{4r_r\left[\left(r_r + \frac{m}{2}\right)^2 \ln\frac{r_r + b_0}{r_r} - b_0\cdot\left(r_r + m\right) + \frac{b_0^2}{2} + \frac{m^3 + \left(m - 2b_0\right)^3}{24\left(r_r + b_0\right)}\right]} \quad (11)$$

та при $b_0 > \delta/2$:

$$\sigma_r^B = \frac{P\cdot\left[m - \delta - \left(l + g_f - g_r\right)\cdot\sin\gamma\right]\cdot m}{4r_r\left[\left(r_r + \frac{m}{2}\right)^2 \ln\frac{2r_r + m}{2r_r} - \frac{m}{2}\cdot\left(r_r + m\right) + \frac{m^2}{8} + \frac{m^3}{12\left(2r_r + m\right)}\right]}. \quad (12)$$

Напруження розтягу на лінії сплавлення кореня шва з ОМ при $b_0 \le \delta/2$ та при $b_0 > \delta/2$ визначаються відповідно за формулами [14]:

$$\sigma_r^T = \frac{P}{r_r\left(\ln\frac{r_r + b_0}{r_r} + \frac{m - b_0}{r_r + b_0}\right)} \quad (13)$$

та

$$\sigma_r^T = \frac{P}{r_r\left(\ln\frac{2r_r + m}{2r_r} + \frac{m}{2r_r + m}\right)}. \quad (14)$$

Отже, теоретичний ККН на лінії сплавлення кореня шва з ОМ при $b_0 \le \delta/2$ визначатиметься як відношення до номінального напруження $\sigma_{nom} = P/\delta$ суми напружень згину (11) та розтягу (13):

$$\alpha_\sigma^r = \frac{\delta}{r_r}\left(\frac{1}{\ln\frac{r_r + b_0}{r_r} + \frac{m - b_0}{r_r + b_0}} + \right. \\ \left. + \frac{m\cdot\left[m - \delta - \left(l + g_f - g_r\right)\sin\gamma\right]}{4\left[\left(r_r + \frac{m}{2}\right)^2 \ln\frac{r_r + b_0}{r_r} - b_0\left(r_r + m\right) + \frac{b_0^2}{2} + \frac{m^3 + \left(m - 2b_0\right)^3}{24\left(r_r + b_0\right)}\right]}\right), \quad (15)$$

а при $b_0 > \delta/2$ – суми напружень (12) та (14):

$$\alpha_\sigma^r = \frac{\delta}{r_r}\left(\frac{1}{\ln\frac{2r_r + m}{2r_r} + \frac{m}{2r_r + m}} + \right. \\ \left. + \frac{m\cdot\left[m - \delta - \left(l + g_f - g_r\right)\sin\gamma\right]}{4\left[\left(r_r + \frac{m}{2}\right)^2 \ln\frac{2r_r + m}{2r_r} - \frac{m}{2}\left(r_r + m\right) + \frac{m^2}{8} + \frac{m^3}{12\left(2r_r + m\right)}\right]}\right). \quad (16)$$

Уточнений підхід до визначення ККН на лицьовій стороні з'єднання. Використання формул типу (1), які передбачають множення теоретичного ККН при розтягу на інші коефіцієнти, що враховують додаткові напруження згину, не є коректним у повній мірі, оскільки відомо [15], що теоретичні ККН для напружень розтягу та згину в одному й тому ж концентраторі відрізняються.

Згідно з даними [16] напруження від згину на лінії сплавлення лицьового підсилення з ОМ для з'єднання одиничної ширини при $a_0 \le \delta/2$ визначається за формулою:

$$\sigma_f^B = \frac{M\cdot\delta}{2r_f\left[\left(r_f + \frac{\delta}{2}\right)^2 \ln\frac{r_f + a_0}{r_f} - a_0\cdot\left(r_f + \delta\right) + \frac{a_0^2}{2} + \frac{\delta^3 + \left(\delta - 2a_0\right)^3}{24\left(r_f + a_0\right)}\right]}, \quad (17)$$

а при $a_0 > \delta/2$ – за формулою:

$$\sigma_f^B = \frac{M\cdot\delta}{2r_f\left[\left(r_f + \frac{\delta}{2}\right)^2 \ln\frac{2r_f + \delta}{2r_f} - \frac{\delta}{2}\cdot\left(r_f + \delta\right) + \frac{\delta^2}{8} + \frac{\delta^3}{12\left(2r_f + \delta\right)}\right]}, \quad (18)$$

де r_f – радіус дуги переходу від лицьового підсилення до ОМ; a_0 – параметр, який характеризує гостроту концентратора поблизу лицьового підсилення і визначається за формулою:

$$a_0 = 4\sqrt{2}\,\frac{r_f\cdot h_f}{\sqrt{g_f^2 + 4h_f^2}}.$$

Напруження розтягу на лінії сплавлення лицьового підсилення з ОМ при $a_0 \le \delta/2$ та при $a_0 > \delta/2$ визначаються відповідно за формулами [16]:

$$\sigma_f^T = \frac{P}{r_f\left(\ln\frac{r_f + a_0}{r_f} + \frac{\delta - a_0}{r_f + a_0}\right)} \qquad (19)$$

та

$$\sigma_f^T = \frac{P}{r_f\left(\ln\frac{2r_f + \delta}{2r_f} + \frac{\delta}{2r_f + \delta}\right)}. \qquad (20)$$

Очевидно, що ексцентриситет на лінії сплавлення дорівнює нулю, тому згинальний момент в цій точці зумовлений лише початковою кутовою деформацією і визначається за формулою (4).

Оскільки напрямок дії напружень від згинального моменту, зумовленого початковою кутовою деформацією, на лицьовій стороні з'єднання співпадає з напрямком дії напружень від осьової сили, то теоретичний ККН на лінії сплавлення лицьового підсилення з ОМ при $a_0 \le \delta/2$ визначатиметься як відношення суми напружень згину (17) з урахуванням (4) та розтягу (19) до номінального напруження:

$$\alpha_\sigma^f = \frac{\delta}{r_f}\left(\frac{1}{\ln\frac{r_f + a_0}{r_f} + \frac{\delta - a_0}{r_f + a_0}} + \frac{\delta l \sin\gamma}{4\left[\left(r_f + \frac{\delta}{2}\right)^2 \ln\frac{r_f + a_0}{r_f} - a_0\left(r_f + \delta\right) + \frac{a_0^2}{2} + \frac{\delta^3 + \left(\delta - 2a_0\right)^3}{24\left(r_f + a_0\right)}\right]}\right), \qquad (21)$$

а при $a_0 > \delta/2$ – суми напружень (18) з урахуванням (4) та (20):

$$\alpha_\sigma^f = \frac{\delta}{r_f}\left(\frac{1}{\ln\frac{2r_f + \delta}{2r_f} + \frac{\delta}{2r_f + \delta}} + \frac{\delta l \sin\gamma}{4\left[\left(r_f + \frac{\delta}{2}\right)^2 \ln\frac{2r_f + \delta}{2r_f} - \frac{\delta}{2}\left(r_f + \delta\right) + \frac{\delta^2}{8} + \frac{\delta^3}{12\left(2r_f + \delta\right)}\right]}\right). \qquad (22)$$

Результати розрахунків та їх обговорення. Розглянемо стикове зварне з'єднання алюмінієвого сплаву АМг6М завтовшки 1,8 мм, для якого в [14] були розраховані теоретичні ККН на лініях сплавлення лицьового підсилення та кореня шва з ОМ без урахування початкової кутової деформації (таблиця), і постулюємо в ньому початкову кутову деформацію $\gamma = 2^o$ та відстань від лінії сплавлення лицьового підсилення з ОМ до точки прикладення осьового навантаження $l/2 = 3$ мм.

Оскільки $b_0 \le \delta/2$ (див. таблицю), то ККН на лінії сплавлення кореня шва з ОМ у досліджуваному з'єднанні визначатимемо за формулою (15), в результаті встановимо, що він складає 1,92. Якщо у формулі (15) покласти $\gamma = 0$, то встановимо, що в аналогічному з'єднанні без початкової кутової деформації ККН на лінії сплавлення кореня шва з ОМ складає 2,4, що підтверджується результатами розрахунків методом скінченних елементів (МСЕ), проведеними в [14]. Таким чином, наявність початкової кутової деформації призводить до зниження напружень поблизу кореня шва на 20 %.

Також для цього з'єднання має місце $a_0 \le \delta/2$ (див. таблицю), тому ККН на лінії сплавлення лицьового підсилення з ОМ визначатимемо за формулою (21), у результаті встановимо, що він складає 2,14. Поклавши у формулі (21) $\gamma = 0$, встановимо, що в аналогічному з'єднанні без початкової кутової деформації ККН на лінії сплавлення лицьового підсилення з ОМ складає 1,62, що також підтверджується результатами розрахунків МСЕ, проведеними в [14]. Отже, початкова кутова деформація призводить до підвищення напружень на лицьовій стороні з'єднання на 32 %.

Отримані аналітичні результати добре узгоджуються з результатами чисельних розрахунків методом скінченних елементів (МСЕ), згідно з якими максимальне напруження поблизу кореня шва склало 2,01 МПа, а поблизу підсилення – 2,22 МПа (рис. 4). Таким чином, напруження на лицьовій стороні з'єднання відрізняються на 3,8 %, а на його кореневій стороні – на 4,7 %.

Прикладене осьове навантаження складало 1,8 Н, для того щоб номінальне напруження у з'єднанні одиничної ширини завтовшки 1,8 мм складало 1 МПа. Таким чином, отримані значен-

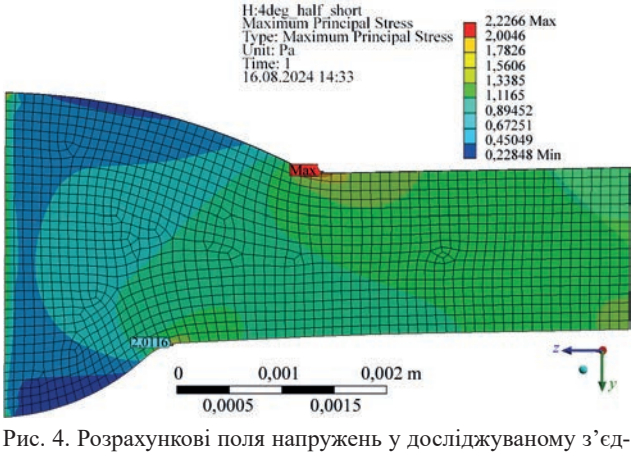


Рис. 4. Розрахункові поля напружень у досліджуваному з'єднанні з початковою кутовою деформацією, отримані МСЕ

Геометричні розміри конструктивних елементів шва стикового з'єднання алюмінієвого сплаву АМг6М, виконаного дуговим зварюванням неплавким електродом в аргоні

Сторона з'єднання	Ширина виступу g, мм	Висота виступу h, мм	Радіус переходу від МШ до ОМ r, мм	Радіус опуклої частини R, мм	Параметр гостроти концентратора a_0 (b_0), мм
Лицьова (f)	7,000	1,000	0,690	5,935	0,536
Коренева (r)	3,750	0,750	0,490	2,229	0,515

ня напружень в зонах концентраторів дорівнювали значенням відповідних ККН, що сприяло спрощенню порівняння аналітичних та чисельних результатів.

Для запобігання впливу розмірів сітки скінченних елементів на значення максимальних локальних напружень вона подрібнювалась в процесі аналізу до тих пір, доки різниця між значеннями напружень в остаточній та попередній моделях не становила менше 5 % [17]. У результаті лінійний розмір елемента остаточної моделі становив 0,1 мм, а сама модель налічувала 16848 елементів з 70308 вузлами.

Оскільки $\alpha_m = 1$, загальний ККН $\alpha_\sigma = 2{,}14$, а теоретичний ККН форми шва $\alpha_{\sigma w} = 1{,}62$, то згідно з формулою (1) ККН кутової деформації α_γ за уточненою теорією складає 1,32, а за формулою (2), яка не враховує різниці між ККН при розтягу та згинанні, ця величина становить майже 1,35. Очікувано, що уточнені розрахунки є менш консервативними, тому що для стикових зварних з'єднань ККН при згинанні дещо менші за ККН при розтягу [18].

Висновки

1. Проведено аналіз існуючих формул для визначення коефіцієнтів, які враховують вплив початкової кутової деформації, зумовленої нерівномірним термічним осіданням стикових зварних швів по товщині з'єднань, на загальну концентрацію напружень. З огляду на природу проаналізованих формул теоретично обґрунтовано, що початкова кутова деформація, повинна призводити не тільки до підвищення напружень на лицьовій стороні з'єднань, а й до їх зниження на кореневій стороні.

2. Вперше отримано аналітичні формули для визначення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень на лінії сплавлення кореня шва з основним металом, які враховують початкову кутову деформацію.

3. Удосконалено аналітичні формули для оцінки впливу початкової кутової деформації на теоретичний коефіцієнт концентрації напружень на лінії сплавлення лицьового підсилення шва з основним металом у частині врахування різниці між коефіцієнтами концентрації напружень розтягу та згину.

4. На прикладі тонколистового стикового зварного з'єднання алюмінієвого сплаву АМг6М, виконаного дуговим зварюванням неплавким електродом в захисних газах, показано, що наявність початкової кутової деформації величиною 2º призводить до збільшення напружень на лицьовій стороні з'єднання на 32 % та до їх зниження на 20 % поблизу кореня шва у порівнянні зі з'єднанням без початкової кутової деформації. Отримані результати підтверджуються чисельними розрахунками методом скінченних елементів – розбіжність результатів не перевищує 5 %.

Список літератури

1. Вершинский С.В., Винокуров В.А., Куркин С.А. и др. (1975) *Проектирование сварных конструкций в машиностроении*. Москва, Машиностроение.
2. Zhu, J., Barsoum, I., Barsoum, Z., Khurshid, M. (2022) Evaluation of local stress-based fatigue strength assessment methods for cover plates and T-joints subjected to axial and bending loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 9 (**45**), 2531–2548. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.13764
3. Remes, H., Romanoff, J., Lillemäe, I. et al. (2017) Factors affecting the fatigue strength of thin-plates in large structures. *International J. of Fatigue*, 101, 397–407. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.11.019
4. Труфяков В.И., Дворецкий В.И., Михеев П.П. и др. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. Киев, Наукова думка. ISBN 5-12-009392-2
5. Makarov, I.I. (1977) Method of calculating the coefficient of stress concentration in butt-welded joints. *Welding Production*, 4 (**24**), 6–8.
6. Colchen, D. (1999) Actual effect of weld defects on the fatigue behavior of aluminium butt welds. *Welding in the World*, 6 (**43**), 25–32. ISSN 00432288
7. Hobbacher, A.F. (2016) *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Second edition. Berlin, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2
8. Lillemäe, I., Lammi, H., Molter, L., Remes H. (2012) Fatigue strength of welded butt joints in thin and slender specimens. *International J. of Fatigue*, **44**, 98–106. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.05.009
9. Mancini, F., Remes, H., Romanoff, J., Reinaldo Goncalves B. (2020) Stress magnification factor for angular misalignment between plates with welding-induced curvature. *Welding in the World*, 4 (**64**), 729–751. DOI: https://doi.org/10.1007/s40194-020-00866-7
10. Knysh, V.V., Klochkov, I.N., Pashulya, M.P., Motrunich S.I. (2014) Increase of fatigue resistance of sheet welded joints of aluminum alloys using high-frequency peening. *The Paton Welding J.*, **5**, 21–27. DOI: https://doi.org/10.15407/tpwj2014.05.04
11. Кныш В.В., Соловей С.А. (2017) *Повышение долговечности сварных соединений с усталостными повреждениями: монография*. Киев, Политехника. ISBN 978-966-622-845-4
12. Lukianenko, A., Labur, T.M., Pokliatskyi, A.G. et al. (2019) Investigation of fatigue strength and norms of emission of harmful substances in the air during MIG and TIG welding of 1460 aluminum-lithium alloy. *FME Transactions*, **3**, 47, 608–612. DOI: https://doi.org/10.5937/fmet1903608L
13. Motrunich, S., Klochkov, I., Poklaytsky A. (2020) High cycle fatigue behaviour of thin sheet joints of aluminium-lithium alloys under constant and variable amplitude loading. *Welding in the World*, **12**, 64, 1971–1979. DOI: https://doi.org/10.1007/s40194-020-00976-2
14. Moltasov, A., Tkach, P., Ustynenko, O., Protasov R. (2022) Effect of load eccentricity on stress condition of butt welded joint with asymmetrical reinforcement. *Strojnicky Casopis*, **1**, 72, 99–108. DOI: https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0010
15. Goyal, R., El-Zein, M., Glinka, G. (2016) A robust stress analysis method for fatigue life prediction of welded structures. *Welding in the World*, **2**, 60, 299–314. DOI: https://doi.org/10.1007/s40194-016-0295-y
16. Moltasov, A.V. (2019) Stressed state of a butt-welded joint with regard for displacements of the centers of inertia. *Materials Science*, **3**, 55, 358–366. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-019-00310-2

17. Молтасов А.В. Ткач П.Н. (2019) Расчёт напряжений вблизи корневого усиления стыкового сварного соединения. *Збірник наукових праць НУК*, **1**, 475, 34–42. DOI: https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).5
18. Молтасов А.В., Ткач П.Н., Мотрунич С.И. (2017) Инженерный метод исследования напряжённого состояния в зонах концентрации сварных соединений с симметричным усилением. *Mechanics and Advanced Technologies*, **1**, 79, 82–90. DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.94900

References

1. Vershinsky, S.V., Vinokurov, V.A., Kurkin, S.A. et al. (1975) *Design of welded structures in mechanical engineering*. Ed. by S.A., Kurkin. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Zhu, J., Barsoum, I., Barsoum, Z., Khurshid, M. (2022) Evaluation of local stress-based fatigue strength assessment methods for cover plates and T-joints subjected to axial and bending loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 9 (**45**), 2531–2548. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.13764
3. Remes, H., Romanoff, J., Lillemäe, I., Frank, D. et al. (2017) Factors affecting the fatigue strength of thin-plates in large structures. *Intern. J. Fatigue*, **101**, 397–407. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.11.019
4. Trufiakov, V.I., Dvoretsky, V.I., Mikheev, P.P. et al. (1990) *Strength of welded joints under variable loads*. Ed. by V.I. Trufiakov. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
5. Makarov, I.I. (1977) Method of calculating the coefficient of stress concentration in butt-welded joints. *Welding Production*, 4(**24**), 6–8.
6. Colchen, D. (1999) Actual effect of weld defects on the fatigue behavior of aluminium butt welds. *Welding in the World*, 6(**43**), 25–32.
7. Hobbacher, A.F. (2016) *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Second ed., Berlin, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2
8. Lillemäe, I., Lammi, H., Molter, L., Remes, H. (2012) Fatigue strength of welded butt joints in thin and slender specimens. *Intern. J. Fatigue*, **44**, 98–106. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.05.009
9. Mancini, F., Remes, H., Romanoff, J., Reinaldo Goncalves, B. (2020) Stress magnification factor for angular misalignment between plates with welding-induced curvature. *Welding in the World*, 4(**64**), 729–751. DOI: https://doi.org/10.1007/s40194-020-00866-7
10. Knysh, V.V., Klochkov, I.N., Pashulya, M.P., Motrunich, S.I. (2014) Increase of fatigue resistance of sheet welded joints of aluminum alloys using high-frequency peening. *The Paton Welding J.*, **5**, 21–27. DOI: https://doi.org/10.15407/tpwj2014.05.04
11. Knysh, V.V., Solovei, S.A. (2017) *Improving the durability of welded joints with fatigue damage: Monography*. Kyiv, Politekhnika [in Russian].
12. Lukianenko, A., Labur, T.M., Pokliatskyi, A.G., Motrunich, S., Bajic, D. (2019) Investigation of fatigue strength and norms of emission of harmful substances in the air during MIG and TIG welding of 1460 aluminum-lithium alloy. *FME Transact.*, **3**, 47, 608–612. DOI: https://doi.org/10.5937/fmet1903608L
13. Motrunich, S., Klochkov, I., Pokliatsky, A. (2020) High cycle fatigue behaviour of thin sheet joints of aluminium-lithium alloys under constant and variable amplitude loading. *Welding in the World*, 12**(64)**, 1971–1979. DOI: https://doi.org/10.1007/s40194-020-00976-2
14. Moltasov, A., Tkach, P., Ustynenko, O., Protasov, R. (2022) Effect of load eccentricity on stress condition of butt welded joint with asymmetrical reinforcement. *Strojnicky Casopis*, 1(**72**), 99–108. DOI: https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0010
15. Goyal, R., El-Zein, M., Glinka, G. (2016) A robust stress analysis method for fatigue life prediction of welded structures. *Welding in the World*, 2(**60**), 299–314. DOI: https://doi.org/10.1007/s40194-016-0295-y
16. Moltasov, A.V. (2019) Stressed state of a butt-welded joint with regard for displacements of the centers of inertia. *Mater. Sci.*, 3(**55**), 358–366. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-019-00310-2
17. Moltasov, A.V., Tkach, P.N. (2019) Stresses calculation near root reinforcement of butt welded joint. *Zb. Naukovykh Prats NUK*, 1(**475**), 34–42 [in Russian]. DOI: https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).5
18. Moltasov, A.A., Tkach, P., Motrunich, S. (2017) Engineering method for research of stress state in concentration areas of welded joints with symmetrical reinforcement. *Mechanics and Advanced Technologies*, 1(**79**), 82–90 [in Russian]. DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.94900

PECULIARITIES OF CALCULATION OF STRESS CONCENTRATION FACTORS IN THIN-SHEET BUTT WELDED JOINTS WITH THE CONSIDERATION OF INITIAL ANGULAR DEFORMATION

A.V. Moltasov, P.M. Tkach, M.M. Dyman, I.G. Tkach, V.G. Kot

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

The paper is devoted to the study of the influence of the initial angular deformation caused by uneven transverse sagging of the butt weld during its cooling on the stress concentration factors (SCF) in the transition zones from the face reinforcement and the weld root to the base metal (BM). An analysis of the existing formulas was carried out to determine the factor that considers the influence of the initial angular deformation on the SCF at the fusion line of the weld with the BM. An analysis of the available formulas was carried out to determine the factor that takes into account the effect of the initial angular deformation on the SCF at the weld line with the BM. As a result, it was found that these formulas were developed for joints with a butt weld symmetrical with respect to the median plane of the plates being welded and cannot be used for calculations near the root of the weld. A theoretical justification is given that the initial angular deformation should lead to a decrease in stresses on the root side of the joint. New analytical formulas for determining the SCF on the fusion line of the weld root with the BM are proposed, that take into account the initial angular deformation. A specific example was used to show that the presence of an initial angular deformation really results in a decrease in stresses on the root side of the joint. The results of analytical calculations were confirmed by numerical calculations using the finite element method. 18 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: butt welded joint, angular deformation, stress concentration, tension, bending, weld root

Отримано 25.09.2024
Отримано у переглянутому вигляді 22.10.2024
Прийнято 12.12.2024

УДК 620.197.2:677.631.2 DOI: https://doi.org/10.37434/as2024.06.04

ФОРМУВАННЯ ПОРИСТИХ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНОВИХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТНОГО ОКСИДУВАННЯ В ЛУЖНИХ ЕЛЕКТРОЛІТАХ, НАСИЧЕНИХ ФОСФАТАМИ ТА БІО-ДОБАВКАМИ

Н.Ю. Імбірович[1], О.Ю. Повстяной[1], К.Я. Куржидловський[2], В.В. Ткачук[1]

[1]Луцький національний технічний університет.43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75. E-mail: n.imbirovych@lntu.edu.ua
[2]Білостоцький технологічний університет. 15-351, м. Білосток, вул. Вєйська, 45А, Польща

Розроблено екологічно чисті електроліти для забезпечення формування покриттів на основі титанових сплавів плазмоелектролітною обробкою, які містять фосфати у вигляді натрію пірофосфату ($Na_4P_2O_7$) та натрію гексаметофосфату ($Na_6P_6O_{18}$), кальцієвмісні компоненти у вигляді гідроксиду кальцію та гідроксилапатиту, а також біодобавку у вигляді діатоміту в різних концентраціях. Дослідження стадійності формування ПЕО-покриттів представлено за допомогою часових залежностей зміни напруги на аноді в процесі обробки. Представлені залежності дали змогу встановити оптимальне співвідношення густини струмів $I_a/I_к$, за яких формуються рівномірні покриття. Експериментальними дослідженнями встановлено наскрізну пористість синтезованих ПЕО-покриттів за різних режимів. Показано, що покриття, які утворюються в електроліті з фосфатами, характеризуються максимальним показником такої пористості (0,75 %), у той час як високе водопоглинання характерне для покриттів, сформованих в електроліті з діатомітом, що становить 1,21 % проти 0,6 %. Такі значення задовільняють умовам біосумісності матеріалів. Бібліогр. 39, рис. 7.

Ключові слова: плазмоелектролітне оксидування; синтез, біосумісність, покриття, пористість, товщина

Вступ. Плазмоелектролітне окислення (ПЕО), також відоме як мікродугове оксидування (МДО) або анодне іскрове осадження (ASD), є економічною, ефективною та екологічно чистою технологією, яка дозволяє створювати оксид на поверхні алюмінію, магнію, титану, цирконію, танталу, ніобію, гафнію та ін. легких металів та їх сплавів [1–5]. Крім того, сформовані таким чином оксидні покриття характеризуються контрольованою морфологією, високою мікротвердістю, зносостійкістю та корозійною стійкістю, відмінною адгезійною міцністю до основи, високими діелектричними та тепловими властивостями [6–14].

У процесі ПЕО на поверхні виникають дискретні іскрові розряди, коли напруга, що подається, перевищує критичне значення (відоме як напруга пробою оксидної напівпровідникової плівки). Розряд відбувається внаслідок втрати діелектричної стійкості оксидної плівки в області низької електропровідності. Цей процес супроводжується іскрінням [15] і виділенням газу [16, 17]. Мікророзряд призводить до високої температури та тиску в локальній області, що дозволяє утворювати оксидні покриття, які складаються не лише зі стехіометричного складу оксидів оброблюваного металу, але також і зі складніших оксидів, які містять сполуки, що утворюються внаслідок плазмохімічних реакцій металу з компонентами електроліту [18]. Хоча мікророзрядні явища та їх вплив на механізм утворення, склад, морфологію та ін. властивості оксидних ПЕО-покриттів на алюмінії і магнії достатньо досліджені, корельовані дослідження титану ще в повній мірі не проведено.

Титан – широко використовуваний метал в техніці завдяки своїм властивостям, таким як висока міцність, низька густина, висока температура плавлення, хороша біосумісність [19–21]. Ефективність використання титанових сплавів в імплантології вивчалася протягом тривалого часу [22, 23]. Висока біосумісність зумовлюється здатністю титану за частки секунди утворювати на своїй поверхні захисний оксидний шар, завдяки чому він не піддається корозії та не виділяє вільних іонів металу, які можуть викликати патологічні процеси навколо імплантату. Завдяки цьому тканини, що оточують протез, залишаються вільними від іонів металів [24].

Титанові сплави використовують як протези плечових, тазостегнових і колінних суглобів, а також для виготовлення пластин, призначених для зрощення переломів. Легкість титану також визначає його широке застосування для медичних інструментів [25, 26]. Однак, після операції із заміни кістки принаймні 17,5 % випадків потребують повторної операції [27]. Неповна остеоінтеграція та бактеріальна інфекція є загрозою для нормаль-

Імбірович Н.Ю. – https://orcid.org/0000-0001-8276-6349, Повстяной О.Ю. – https://orcid.org/0000-0002-1416-225X, Куржидловський К.Я. – https://orcid.org/0000-0003-3875-4820, Ткачук В.В. – https://orcid.org/0009-0007-1875-4774
© Н.Ю. Імбірович, О.Ю. Повстяной, К.Я. Куржидловський, В.В. Ткачук, 2024

ного приживлення імплантату. Автори [28] описують у своїх роботах ефективне використання покриттів із широким діапазоном пористості. Цей ефект призводить до вищої остеоінтеграції [29].

Відомо, що основними недоліками титанових сплавів є погана оброблюваність різанням, високий коефіцієнт тертя, відносно низький модуль пружності, а для імплантології також додається низька хімічна активність і адгезійна міцність до м'язових тканин та кістки. Ці факти можуть призвести до резорбції кісток навколо них [30, 31].

Ефективним методом запобігання цьому ефекту є попереднє нанесення на поверхню матеріалу бактерицидного шару. Arash Fattah-alhosseini та ін. вказують, що слід велику увагу приділяти нетоксичності покриттів, що може призвести до появи мультидистентних патогенів [32, 33]. Можливим вирішенням цієї проблеми є поверхневі модифікації поверхні, які покращують остеоінтеграцію імплантатів або зменшують бактеріальну інфекцію. Враховуючи вищезазначене, перспективним є використання в кістковій пластиці композицій з антимікробними властивостями [34, 35]. Саме таким вимогам і відповідає метод ПЕО як перспективний метод з можливістю модифікування поверхні легких сплавів різноманітними кальцієвмсіними компонентами, фосфатами та біодобавками [36–39].

Мета даної роботи – розробка технології насичення оксидних ПЕО-покриттів на основі титанового сплаву фосфатами та діатомовою землею (діатоміт) для підвищення їх пористості та шорсткості.

Методика досліджень. Об'єктом дослідження є покриття на титановому сплаві Ti-6Al-4V (клас 5), яке синтезували методом плазмоелектролітного оксидування. Випробовували круглі плоскі зразки з такими розмірами: діаметр 20 мм, товщина 5 мм. Електролітом слугував водний розчин на основі калію гідроксиду (KOH), кальцію гідроксиду ($Ca(OH)_2$), натрію силікату ($Na_2O(SiO_2)_n$), натрію пірофосфату ($Na_4P_2O_7$), натрію гексаметофосфату ($Na_6P_6O_{18}$) за їх різної концентрації (0,5…20 г/л). Для з'ясування впливу біоактивних природних мінералів на властивості покриття в електроліт додавали кальцію гідроксилапатит ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) та діатоміт (основний компонент – SiO_2) у кількості 1 та 20 г/л відповідно. Режими ПЕО характеризували відношенням анодного до катодного струмів, I_a та $I_к$, відповідно, а також тривалістю обробки.

У даній роботі розглянуто характеристики мікророзряду при плазмоелектролітному оксидуванні через визначення електрофізичних параметрів синтезу покриттів. Морфологію покриттів досліджували на мікроскопі Tagarno Prestige FHD controller Xplus і тривимірному лазерному скануючому мікроскопі Keyence VHX 7000. Шорсткість покриттів аналізували відповідно до ДСТУ ISO 4287:2012 за наступними параметрами: R_a – середнє арифметичне відхилення профілю, R_z – висота нерівностей профілю по 10 точках. Густину покриттів визначали за допомогою пікнометричного методу (ДСТУ ISO 2811-1:2019), наскрізну пористість і водопоглинання – гідростатичним зважуванням (ДСТУ Б А.1.1-49-94).

Результати експериментів та їх аналіз. Виявлені залежності (рис. 1) дали можливість встановити, що на формування покриттів впливає співвідношення густини струмів.

Для встановлення впливу фосфатів і кальцієвмісних компонентів на стадійність процесу синтезу оксидо-керамічних покриттів було досліджено зміну напруги в часі в електролітах без фосфатів та з їх додаванням.

В електроліті 2 г/л KOH + 3 г/л $Na_2O(SiO_2)_n$ початкові напруги, за яких формується покриття, становлять 73…160 В (рис. 1). Причому на етапі перших 10 хв напруги зростають стрімкіше, що пояснюється наявністю на поверхні титанових сплавів оксидної плівки, яка має уніполярну провідність. Саме тому для забезпечення умов можливості створення покриття на таких сплавах цю плівку необхідно усувати. За умов наявності високих напруг на електроді відбувається інжекція електронів в оксидний шар. Це й пояснює початкове зростання напруги, яка наявна для всіх досліджуваних систем.

Згідно з отриманими результатами можна зробити висновок, що на величину напруги на ано-

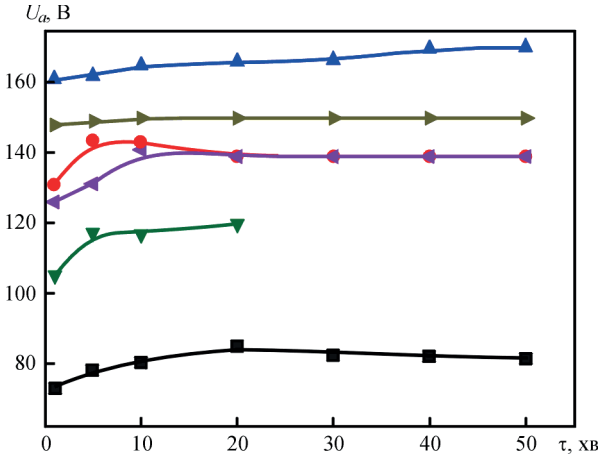


Рис. 1. Електрофізичні параметри ПЕО-сплаву Ti–6Al–4V в електроліті 2 г/л KOH + 3 г/л $Na_2O(SiO_2)_n$ за співвідношення густини струмів 2, 1,5 і 1,25 та часу синтезу 20 і 50 хв: ■ – $I_a/I_к$ = 10/5 А/дм^2; ● – $I_a/I_к$ = 75/60 А/дм^2; ▲ – $I_a/I_к$ = 50/40 А/дм^2; ▼ – $I_a/I_к$ = 150/100 А/дм^2; ◄ – $I_a/I_к$ = = 150/120 А/дм^2; ► – $I_a/I_к$ = 100/80 А/дм^2

ді впливає густина струму, яка задається сталою в процесі синтезу. Так, синтезуючи покриття за $I_а/I_к$ = 10/5 А/дм^2, середнє значення напруги, за якої формується покриття, дорівнює 82,5 В. Якщо ж задати співвідношення густин струмів $I_а/I_к$ = = 150/100 А/дм^2, то початкова напруга синтезу на аноді зростає на 32 В, а середнє значення напруги, за якої формується покриття, зростає на 35,8 В. Підвищення густини струму на аноді в 15 разів, а на катоді – в 24 рази ($I_а/I_к$ = 150/120 А/дм^2) призводить до зростання напруги на початку синтезу на 53 В, а середнє значення напруги, за якої формується покриття за даного режиму, зростає ще на 3,9 В порівняно з напругою на початку процесу ПЕО за цього ж режиму.

Слід зауважити, що після пробою оксидної плівки відбувається процес окислення металу у високотемпературному каналі з проходженням плазмохімічних реакцій на аноді. Такий процес відображається на кривій залежності напруги від часу синтезу прямолінійною ділянкою.

На рис. 2 наведено залежності зміни напруги синтезу в безфосфатних електролітах за співвідношення $I_а/I_к$ = 10/10 та 20/20 А/дм^2. З отриманих залежностей видно, що електроліти з більшою концентрацією забезпечують вищу провідність, що призводить до зменшення напруги досліджуваної системи.

Підвищення густини струмів призводить до зростання напруги на аноді, причому інжекція електронів в оксидний шар забезпечується з меншими енергетичними затратами на пробійний канал при співвідношенні густини струмів $I_а/I_к$ = 20/20 А/дм^2.

Для насичення покриттів фосфатами було розроблено електроліт з компонентами натрію пірофосфату ($Na_4P_2O_7$) та натрію гексаметафосфату ($Na_6P_6O_{18}$). Отримані залежності зміни напруги синтезу в часі представлено на рис. 3.

Синтез оксидних ПЕО-покриттів в електроліті з фосфатами призводить до стрімкого зростання напруги на аноді. Серед наведених результатів слід виокремити режим співвідношення густини струмів $I_а/I_к$ = 1,5, за якого покриття формуються рівномірно.

Отримавши результати залежностей за співвідношення густини струмів 15/10 А/дм^2 в електроліті з доданими солями встановили, що напруга на аноді співпадає з напругою, яка фіксується при синтезі титанового сплаву в електроліті без солей натрію із вмістом гідроксиду кальцію [1]. Отже, стає зрозуміло, що солі натрію підвищують провідність робочого середовища.

Насичення покриттів кальцієвмісним компонентами здійснювали через додавання до електроліту гідроксилапатиту (НАр) і діатоміту. Електро-

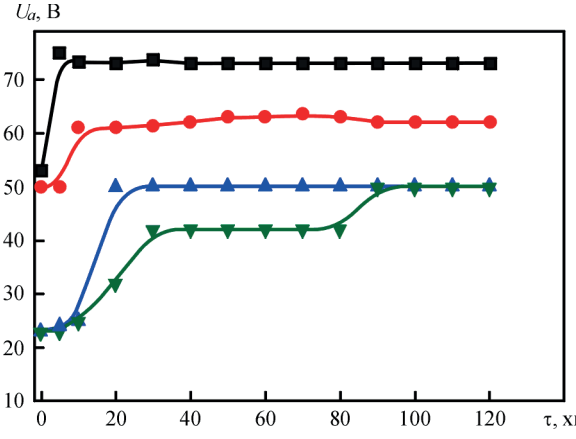


Рис. 2. Електрофізичні параметри ПЕО-сплаву Ti-6Al-4V в електролітах 3 г/л КОН + 2 г/л ($Na_2O(SiO_2)_n$ (■, ▲) та 5 г/л КОН + 5 г/л ($Na_2O(SiO_2)_n$ (●, ▼) за час синтезу 120 хв при $I_а/I_к$ = 10/10 (▲, ▼) та 20/20 А/дм^2 (■, ●)

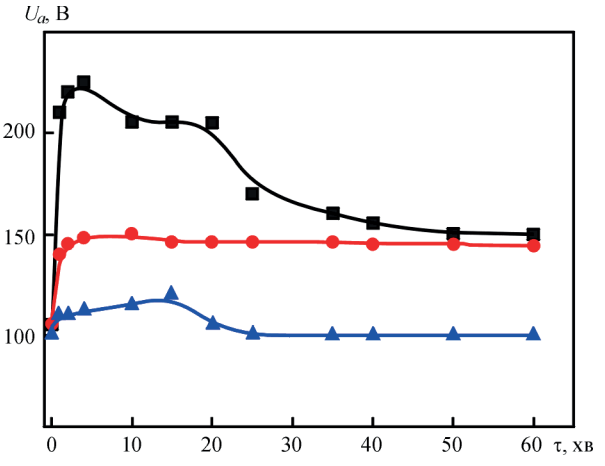


Рис. 3. Електрофізичні параметри ПЕО-сплаву Ti-6Al-4V в електроліті складу 0,5 г/л КОН + 0,5 г/л $Ca(OH)_2$+ + $Na_2O(SiO_2)_n$ + 0,5 г/л $Ca(OH)_2$ + 0,5 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 0,5 г/л $Na_4P_2O_7$ при $I_а/I_к$ = 20/20 (■), 15/10 (●) та 10/10 А/дм^2 (▲)

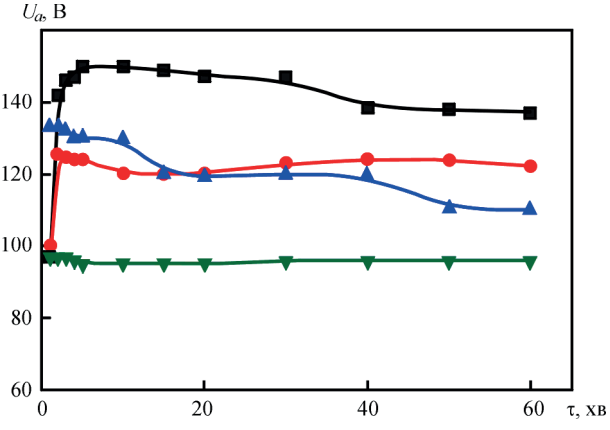


Рис. 4. Електрофізичні параметри синтезу ПЕО-покриття на титановому сплаві в електроліті 5 г/л КОН + 5 г/л $Ca(OH)_2$ + + $5Na_2O(SiO_2)_n$ + 5 г/л $Ca(OH)_2$ + 5 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 5 г/л $Na_4P_2O_7$ + 1 г/л НАр та 20 г/л КОН + 20 г/л $Ca(OH)_2$ + $20Na_2O(SiO_2)_n$ + 20 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 20 г/л $Na_4P_2O_7$+20 г/л діатоміт: ■ – з НАр $I_а/I_к$ = 10/10 А/дм^2;● – з НАр $I_а/I_к$ = 20/20 А/дм^2;▲ – з діатомітом $I_а/I_к$ = 10/10 А/дм^2;▼ – з діатомітом $I_а/I_к$ = 20/20 А/дм^2

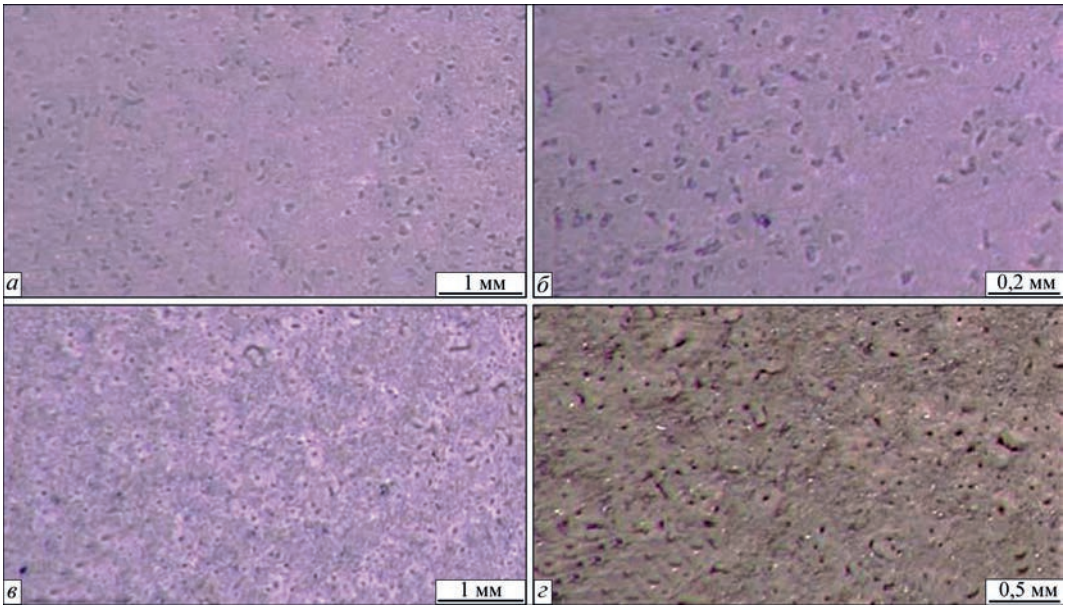


Рис. 5. Поверхня ПЕО-покриттів, синтезованих в електролітах: *а* – 5 г/л KOH + 5 г/л р.с. + 5 г/л $Ca(OH)_2$ + 5 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + + 5 г/л $Na_4P_2O_7$; *б* – 5 г/л KOH + 5 г/л р.с. + 5 г/л $Ca(OH)_2$ + 5 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 5 г/л $Na_4P_2O_7$ + 1 г/л НАр; *в* – 20 г/л KOH + 20 г/л р.с. + 20 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 20 г/л $Na_4P_2O_7$; *г* – 20 г/л KOH + 20 г/л р.с. + 20 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 20 г/л $Na_4P_2O_7$ + 20 г/л діатоміт

фізичні параметри формування покриттів у таких електролітах представлено на рис. 4. Виявлені залежності дали змогу встановити, що покриття формуються рівномірно із введенням гідроксилапатиту та діатоміту. Отже, розроблені електроліти забезпечують задовільну провідність. Як видно з представлених залежностей, пробій оксидної плівки в електроліті з НАр вимагає високого запасу енергії, що не можна сказати про формування покриттів в електроліті з діатомітом, де відсутнє стрімкоподібне зростання напруги на аноді. Надання системі вищого співвідношення густини струмів, а саме, 20/20 А/дм^2 у порівнянні з 10/10 А/дм^2, призводить до зменшення напруги, за якої відбувається синтез покриття, приблизно на 25 В. Така ж закономірність зберігається і для синтезу покриттів в електроліті з діатомітом (рис. 4).

Також слід зазначити, що додавання до електроліту діатоміту призводить до зростання електропровідності робочого середовища, що зменшує напругу на аноді в процесі ПЕО.

Для встановлення міри активності іонів водню в середовищі електролітів або їх ступеня кислотності визначали рівень pH середовища до процесу синтезу покриттів і після закінчення проведення поверхневої обробки титанового сплаву. Отже, було виявлено, що перед початком синтезу pH електролітів становив 12,6. При завершенні процесу нанесення покриття на поверхню металу рівень pH незначно зростає та становить 12,8.

Поверхня покриттів, отриманих внаслідок ПЕО, вкрита кратерами та порами і має досить високу шорсткість (рис. 5). Це пояснюється особливостями процесу синтезу, який характеризується постійним утворенням пробійних каналів і зниканням їх протягом всього часу ПЕО. Дослідження морфології поверхні та її шорсткості дали можливість встановити, що покриття синтезовані в електроліті з діатомітом (електроліт 20 г/л KOH + + 20 г/л р.с. + 20 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 20 г/л $Na_4P_2O_7$ + 20 г/л діатоміту) мають більшу шорсткість поверхні (R_a = 40 мкм, R_z = 239 мкм), тоді як покриття, які синтезувались в електроліті складу 20 г/л KOH + 20 г/л р.с. + 20 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 20 г/л $Na_4P_2O_7$, мають шорсткість R_a = 5...137 мкм та R_z = 28…100 мкм. Тривалість обробки також впливає на шорсткість поверхні. Так, покриття, які оброблялись довше в два рази (60 проти 30 хв)

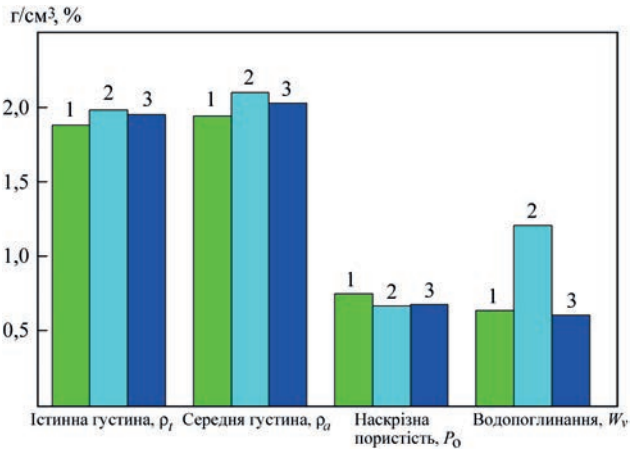


Рис. 6. Результати істинної густини, середньої густини, пористості та водопоглинання ПЕО-покриттів, синтезованих в різних електролітах: *1* – 0,5 г/л KOH + 0,5 г/л р.с. + 0,5$Ca(OH)_2$ + 0,5 г/л $Na_4P_2O_7$ + 0,5 г/л $Na_6P_6O_{18}$; *2* – 20 KOH + 20 г/л р.с. + 1 г/л $Ca(OH)_2$ + 20 г/л $Na_4P_2O_7$ + 20 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 20 г/л діатоміт; *3* – 3 г/л KOH + 2 г/л р.с.+ 3 г/л $Ca(OH)_2$

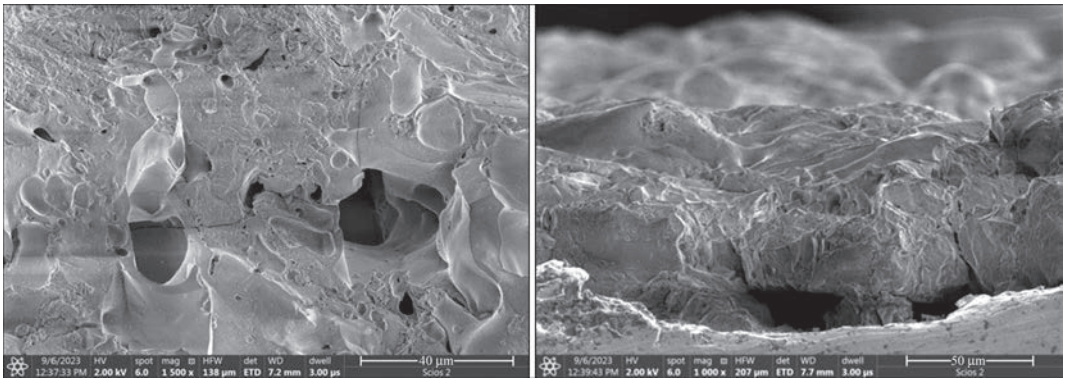


Рис. 7. Фрактограма покриття за різних збільшень, синтезованого на титановому сплаві в середовищі 20 г/л р.с. + 20 г/л КОН + 20 г/л $Na_4P_2O_7$ + 20 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 20г/л діатоміт при $I_a/I_к$ = 10/10 А/дм^2, час обробки 30 хв

мають шорсткість поверхні в 5 разів більшу. При цьому параметр шорсткості R_a внаслідок вдвічі довшого часу обробки зростає від значення 20,4 до 42,1 мкм, а параметр шорсткості R_z змінюється від 119,7 до 239,4 мкм відповідно.

Дослідження пористості покриттів дали можливість встановити, що покриття отримуються з наскрізною пористістю максимально 0,75 %, що характерно для покриттів, синтезованих в електролітах лише з фосфатами. Відкрита пористість зі значенням 0,67 % властива для покриттів, які синтезовані в лужному електроліті 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла. Незначно спадає відсоток наскрізної пористості для покриттів, які сформувались у середовищі з діатомітом.

Дослідження на водопоглинання покриттів дали можливість виявити, що найбільш пористими серед зазначених формуються покриття в середовищі з діатомітом. Водопоглинання для такого виду покриттів складає 1,21 % порівняно з покриттями, синтезованими в електроліті з фосфатами 0,64 % і в лужному електроліті, який містить лише КОН і рідке скло 0,61 %.

Такі результати дають можливість встановити, що покриття, синтезовані в електроліті з діатомітом, характеризуються закритими порами, що підтверджується фрактограмою зламу, яка представлена на рис. 7.

З цієї фрактограми видно, що пори в покритті мають різний розмір, оплавляються і таким чином перекривають одна одну. Такий результат є позитивним, так як м'язові тканини мають змогу впроваджуватись в пори, що призводить до швидшого приживлення такого імплантату в живому організмі та скорочення реабілітаційного періоду.

Висновки

1. За умов синтезу на титановому сплаві біопокриттів методом плазмоелектролітного оксидування встановлено вплив співвідношення густини анодного до катодного струмів на значення напруги на аноді. Виявлено, що за $I_a/I_к$ = 10/5 А/дм^2 в електроліті складу 2 г/л КОН + 3 г/л рідкого скла напруга на аноді в процесі ПЕО є найменшою, а саме, ~83 В, у той час як серед підібраних експериментально співвідношень $I_a/I_к$ найвище значення напруги на аноді забезпечується при $I_a/I_к$ = 50/40 А/дм^2.

2. Додавання до електроліту фосфатів призводить до стрімкого зростання напруги на аноді, яка збільшується вдвічі порівняно з безфосфатними електролітами.

3. У фосфатних електролітах покриття синтезується рівномірно за співвідношення $I_a/I_к$ = 15/10 А/дм^2.

4. Введення в електроліт з пірофосфатом і гексаметофосфатом натрію кальцієвмісних компонентів зменшує енергетичні витрати системи та стабілізує процес формування покриття, що відбивається на його рівномірності по всій поверхні.

5. Присутність в електроліті діатоміту значно підвищує провідність робочого середовища, що призводить до зменшення напруги на аноді та усуває ділянку стрімкого зростання напруги в перші хвилини синтезу покриття, що відповідає за пробій оксидної плівки на титановому сплаві в лужних електролітах, які містять лише компоненти гідроксиду калію та рідкого скла.

6. Встановлено, що ПЕО-покриття формуються з найвищою наскрізною пористістю в електроліті складу 0,5 г/л КОН + 0,5 г/л р.с. + 0,5 г/л $Ca(OH)_2$ + + 0,5 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 0,5 г/л $Na_4P_2O_7$, яка становить 0,75 %.

7. Дослідженнями виявлено, що покриття, які синтезуються на титановому сплаві в електроліті складу 20 г/л р.с. + 20 г/л КОН + 20 г/л $Na_4P_2O_7$ + + 20 г/л $Na_6P_6O_{18}$ + 20 г/л діатоміт, характеризуються високим водопоглинанням, яке становить 1,21 %, що вдвічі перевищує такий показник для покриттів, які утворились у фосфатному електроліті та в електроліті без додавання додаткових компонентів.

Список літератури/References

1. Imbirovych, N., Boyarska, I., Povstyanoy, O. et al. (2023) Modification of oxide coatings synthesized on zirconium alloy by the method of plasma electrolytic oxidation. *AIP Conference Proceedings*, 2949(**1**), 020011. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0165655
2. Povstyanoy, O., Imbirovich, N., Redko, R. et al. (2024) Numerical evaluation of the properties of highly efficient titanium porous materials. Eds by V., Tonkonogyi, V. Ivanov et al. In: Advanced Manufacturing Processes InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., 307–317. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_28
3. Duan, H., Yan, C., Wang, F. (2007) Growth process of plasma electrolytic oxidation films formed on magnesium alloy AZ91D in silicate solution. *Electrochim. Acta*, 52(**12**), 5002–5009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.02.021
4. Tillous, K., Toll-Duchanoy, T., Bauer-Grosse, E. et al. (2009) Microstructure and phase composition of microarc oxidation surface layers formed on aluminium and its alloys 2214-T6 and 7050-T74. *Surf. Coat. Technol.*, 203(**19**), 2969–2973. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.03.021
5. Curran, J.A., Clyne, T.W. (2005) Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium. *Surf. Coat. Technol*., 199(**2-3**), 168–176. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.09.037
6. Petrosyanis, A.A., Malyshev, V.N., Fedorov, V.A., Markov, G.A. (1984) Wear kinetics of coatings made by microarcing oxidation. *Trenie i Iznos*, **5**, 350–354.
7. Student, M., Pohrelyuk, I., Padgurskas, J. et al. (2023) Influence of plasma electrolytic oxidation of cast Al-Si alloys on their phase composition and abrasive wear resistance. *Coatings*, 13(**3**), 637. DOI: https://doi.org/10.3390/coatings13030637
8. Yang, X., Ma, A., Liu, J. et al. (2019) Microstructure and corrosion resistance of yellow MAO coatings. *Surface Eng.*, 35(**4**), 334–342. DOI: https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1445939
9. Mori, Y., Koshi, A., Jinsun Liao, J. et al. (2014) Characteristics and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on AZ31B Mg alloy formed in phosphate – Silicate mixture electrolytes. *Corrosion Sci.*, **88**, 254–262. DOI: https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.038
10. Nykyforchyn, H.M., Agarwala, V.S., Klapkiv, M.D., Posuvailo, V.M. (2008) Simultaneous reduction of wear and corrosion of titanium, magnesium and zirconium alloys by surface plasma electrolytic oxidation treatment. *Advanced Materials Research*, **38**, 27–35. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.38.27
11. Pauporté, T., Finne, J., Kahn-Harari, A., Lincot, D. (2005) Growth by plasma electrolysis of zirconium oxide films in the micrometer range. *Surface and Coatings Technology*, 199(**2-3**), 213–219. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.03.003
12. Timoshenko, A.V., Magurova, Yu.V. (2005) Investigation of plasma electrolytic oxidation processes of magnesium alloy MA2-1 under pulse polarisation modes. *Surf. Coat. Technol.*, 199(**2-3**), 135–140. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.09.036
13. Zhou, H., Li, F., He, B. et al. (2007) Air plasma sprayed thermal barrier coatings on titanium alloy substrates. *Surf. Coat. Technol.*, 201(**16-17**), 7360–7367. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.02.010
14. Shokouhfar, M., Dehghanian, C., Baradaran, A. (2011) Preparation of ceramic coating on Ti substrate by plasma electrolytic oxidation in different electrolytes and evaluation of its corrosion resistance. *Appl. Surf. Sci*., **257**(7), 2617–2624. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.10.032
15. Stojadinovic, S., Vasilic, R., Petkovic, M. et al. (2010) Luminescence properties of oxide films formed by anodization of aluminum in 12-tungstophosphoric acid. *Electrochim. Acta*, 55(**12**), 3857–3863. DOI: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.02.01
16. Snizhko, L.O., Yerokhin, A.L., Pilkington, A. et al. (2004) Anodic processes in plasma electrolytic oxidation of aluminium in alkaline solutions. *Electrochim. Acta*, 49(**13**), 2085–2095. DOI: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2003.11.027
17. Stojadinović, S., Rastko, V., Petkovic, M., Zekovic, L. (2011) Plasma electrolytic oxidation of titanium in heteropolytungstate acids. *Surf. Coat. Technol.*, 206(**2-3**), 575–581. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.090
18. Sundararajan, G., Rama Krishna, L. (2003) Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology. *Surf. Coat. Technol*., 167(**2-3**), 269–277. DOI: https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00918-0
19. Brewer, W.D., Bird, R.K., Wallace, T.A. (1998) Titanium alloys and processing for high speed aircraft. *Mater. Sci. and Engin.: A*, 243(**1-2**), 299–304. DOI: https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00818-6 A 243(1998)299
20. Leyens, C., Peters, M. (2003) *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany. DOI: https://doi.org/10.1002/3527602119
21. Yao, Z.Q., Ivanisenko, Yu., Diemant, T. et al. (2010) Synthesis and properties of hydroxyapatite-containing porous titania coating on ultrafine-grained titanium by micro-arc oxidation. *Acta Biomater*., 6(**7**), 2816–2825. DOI: https://doi.org/10.116/j.actbio.2009.12.053
22. Hench, L.L. (1998) Biomaterials: A forecast for the future. *Biomaterials*, **19**, 1419–1423. DOI: https://doi.org/10.1016/s0142-9612(98)00133-1
23. Jae-Young Rho, Liisa Kuhn-Spearing, Peter Zioupos (1998) Mechanical properties and the hierarchical structure of bone. *Medical Engineering & Physics*, 20(**2**), 92–102. DOI: https://doi.org/10.1016/S1350-4533(98)00007-1
24. Dabdoub, S.M., Tsigarid, A.A., Kumar, P.S. (2013) Patient-specific analysis of periodontal and peri-implant microbiomes. *J. of Dental Research*, 92(**12**), 1685–1755. DOI: https://doi.org/10.1177/0022034513504950
25. Fakhr Nabavi, H., Aliofkhazraei, M. (2019) Morphology, composition and electrochemical properties of bioactive-TiO_2/HA on CP-Ti and Ti6Al4V substrates fabricated by alkali treatment of hybrid plasma electrolytic oxidation process (Estimation of porosity from EIS results). *Surf. Coat. Technol.*, **375**, 266–291, DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.032
26. Azmat, A., Asrar, S., Channa, I.A. et al. (2023) Comparative study of biocompatible titanium alloys containing non-toxic elements for orthopaedic implants. *Crystals,* **13**, 467. DOI: https://doi.org/10.3390/cryst13030467
27. Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R., Gogia, A.K. (2009) Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants. A review. *Progress in Mater. Sci.*, **54**, 397–425. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004
28. Zyman, Z.Z., Rokhmistrov, D.V., Glushko, V.I. (2010) Structural and compositional features of amorphous calcium phosphate at the early stage of precipitation. *J. Mater. Sci. Mater. Med*., 21(**1**), 123–130. DOI: https://doi.org/10.1007/s10856-009-3856-4
29. Furko, M., Balázsi, K., Balázsi, C. (2023) Calcium phosphate loaded biopolymer composites – A comprehensive review on the most recent progress and promising trends. *Coatings,* **13**, 360. DOI: https://doi.org/10.3390/coatings13020360
30. Colombo, P.V., Tanner, A.C.R. (2019) The role of bacterial biofilms in dental caries and periodontal and peri-implant diseases: A historical perspective. *J. Dent. Res*., 98(**4**), 373–385. DOI: https://doi.org/10.1177/0022034519830686
31. Mazinani, A., Nine, M.J., Chiesa, R. et al. (2021) Graphene oxide (GO) decorated on multi-structured porous titania fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) for enhanced antibacterial performance. *Materials & Design*, **20**, 109443. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109443
32. Arash Fattah-alhosseini, Maryam Molaei, Navid Attarzadeh et al. (2020) On the enhanced antibacterial activity of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings that incorporate particles: A review. *Ceramics Intern.*, 46(**13**), 20587–20607 DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.206
33. Totosko, O.V., Stukhlyak, P.D., Mykytyshyn, A.H., Levytskyi, V.V. (2020) Investigation of electrospark hydraulic shock influence on adhesive-cohesion characteristics of epoxy coatings. *Functional materials*, 27(**4**), 760–766. DOI: https://doi.org/10.15407/fm27.04.760

34. Shu-Chuan Liao, Chia-Ti Chang, Chih-Ying Chen et al. (2020) Functionalization of pure titanium MAO coatings by surface modifications for biomedical applications. *Surf. Coat. Technol.*, **394**, 125812. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125812
35. Topal, E., Rajendran, H., Zgłobicka, I. et al. (2020) Numerical and experimental study of the mechanical response of diatom frustules. *Nanomaterials,* **10**, 959. DOI: https://doi.org/10.3390/nano10050959
36. Dunleavy, C.S., Golosnoy, I.O., Curran, J.A., Clyne, T.W. (2009) Characterization of discharge events during plasma electrolytic oxidation. *Surf. Coat. Tecnol.*, **203**, 3410–3419. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.004
37. Wang, H.Y., Zhu, R.F., Lu, Y.P. et al. (2014) Preparation and properties of plasma electrolytic oxidation coating on sand-blasted pure titanium by a combination treatment. *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.*, **42**, 657–664. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.06.005
38. Kang, B.S., Sul, Y.T., Johansson, C.B. et al. (2012) The effect of calcium ion concentration on the bone response to oxidized titanium implants. *Clinical Oral Implants Research*, **23**, 690–697. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2011.02177.x
39. Wang, M.S., Lee, F.P., Shen, Y.D. et al. (2015) Surface, biocompatible and hemocompatible properties of meta-amorphous titanium oxide film. *Int. J. of Applied Ceramic Technology*, **12**, 341–350. DOI: https://doi.org/10.1111/ijac.12184

TITANIUM ALLOYS BY THE METHOD OF PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION IN ALKALINE ELECTROLYTES SATURATED WITH PHOSPHATES AND BIO-ADDITIVES

N.Yu. Imbirovych[1], O.Yu. Povstyanoy[1], K.J. Kurdzydlowski[2], V.V. Tkachuk[1]

[1]Lutsk National Technical University. 75 Lvivska Str., 43018, Lutsk, Ukraine. E-mail: n.imbirovych@lntu.edu.ua
[2]Bialystok University of Technology. 45A, Wiejska Str., 15-351 Bialystok, Poland

Environmentally friendly electrolytes have been developed to ensure the formation of coatings based on titanium alloys by plasma electrolytic processing, which contain phosphates in the form of sodium pyrophosphate ($Na_4P_2O_7$) and sodium hexamethophosphate ($Na_6P_6O_{18}$), calcium-containing components in the form of calcium hydroxide and hydroxylapatite, as well as a bio-additive in the form of diatomite in different concentrations. The study of the stages of PEO coating formation is presented with the help of time dependences of the voltage change on the anode during the processing. The presented dependencies made it possible to establish the optimal ratio of I_a/I_k current density, under which uniform coatings are formed. The end-to-end porosity of the synthesized PEO-coatings in different modes was determined through experimental studies. It is shown that coatings formed in an electrolyte with phosphates are characterized by the maximum rate of such porosity (0.75 %), while high water absorption is characteristic of coatings formed in an electrolyte with diatomite, which is 1.21 % against 0.6 %. Such values satisfy the conditions of biocompatibility of the materials. 39 Ref., 7 Fig.

Keywords: plasma-electrolyte oxidation; synthesis, biocompatibility, coating, porosity, thickness

Отримано 17.07.2024
Отримано у переглянутому вигляді 02.09.2024
Прийнято 20.11.2024

ЗВАРЮВАННЯ ПРИ БУДІВНИЦТВІ СПОРТИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ НОВИХ ВИДІВ СПОРТУ

Сквош* – це вид спорту, який не дуже знайомий не тільки пересічному українцю, але й багатьом у світі. Між тим *Mathpes Squash Court*, що є професійним відкритим сквош комплексом в Нью-Йорку, може це змінити. Розташований на задньому дворі діючого цеху з виробництва сталі, цей проєкт має на меті підвищити популярність цього виду спорту та зробити його доступнішим і помітнішим.

Зазвичай сквош-корти встановлюються в закритих приміщеннях та зроблені з дерева, скла або бетону. Але виклик, зроблений епідемією COVID-19, було прийнято. І спеціалісти з компанії *Jacobschang Architecture* з Нью-Йорку запропонували своє бачення сквош-корту на відкритому повітрі. Для такого типу проєкту, який немає покрівлі і знаходиться під впливом кліматичних умов Нью-Йорку, вони використали сталь.

Скляні корти виправдовують себе лише на відкритому повітрі за умов короткочасних турнірів. У той же час сталеві конструкції найбільш привабливі для їх постійного використання в різних кліматичних умовах.

Передня та бокові панелі сталевого сквош-корту виготовляються з гарячекатаної вуглецевої сталі завтовшки 5/16 дюйма, що зварюються в стик, добре відшліфовуються, покриваються спеціальним лаком та монтуються за допомогою зварювання на сталеві стовпи і поперечини. Підлога виготовлена теж зі сталі за технологією корабельної палуби з використанням водостійкої фарби. Задня стінка корту зроблена з загартованого скла для зручності глядачів та суддів.

Професійні гравці, які випробовували сталевий корт, відзначили, що він відповідає всім умовам класичних кортів. Тому вже у червні 2023 р. сталеві сквош-корти були акредитовані Професійною асоціацію гравців у сквош як такі, на яких можна проводити професійні турніри. А вже восени 2023 р. чемпіонкою турніру *Intsel Steel Pro Outdoor Invitational* на цьому корті стала наша співвітчизниця Аліна Бушма (на фото в центрі).

*Сквош – це ігровий вид спорту з м'ячем та ракеткою, що ведеться на корті, оточеному стінками з чотирьох сторін. Дебютує як Олімпійський вид спорту в Лос-Анджелесі в 2028 р.

УДК 621.791.92 DOI: https://doi.org/10.37434/as2024.06.05

КОМПЕНСАЦІЯ ПРОСТОРОВОЇ ДЕФОРМАЦІЇ У ВИРОБАХ ПРИ АДИТИВНОМУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ НАПЛАВЛЕННІ

В.А. Матвійчук

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

Метою роботи є аналіз та оптимізація формоутворення лопатки ГТД в процесі виготовлення за адитивною електронно-променевою технологією. Методом комп'ютерного моделювання в програмі Simufact Additive досліджено вплив технологічних параметрів друку на формоутворення виробу, здійснено аналіз усадкових явищ, які виникають в процесі друку. Проведено симуляцію друку та порівняння отриманих результатів з еталонною моделлю. Створено оптимізовані комп'ютерні моделі лопаток ГТД. За результатами розрахунку при використанні оптимізованих моделей відхилення геометричних розмірів надрукованих лопаток не перевищує допусків на розмір виробу ± 0,3 мм. Бібліогр. 6, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: адитивні технології, електронний промінь, наплавлення, моделювання, формоутворення, 3D принтер

Вступ. При створені виробів з металу адитивним методом у процесі пошарового нагріву та охолодження відбуваються локальні усадкові явища, які призводять до загальних залишкових деформацій – викривлення лінійних розмірів надрукованої деталі [1–3]. Для компенсації залишкових деформацій виникає потреба в корекції моделі виробу з урахуванням очікуваних деформацій.

У процесі друку на форму виробів впливає низка факторів:

– матеріал, з якого виробляється деталь;

– технологічні параметри друку;

– просторове положення виробу відносно платформи;

– розташування деталі в збірці виробів;

– форма технологічних опор;

– загальна температура збірки виробів та оточуючого середовища.

Вважаючи на те, що вироби зазвичай мають складну геометричну форму, виникає проблема отримання кінцевого виробу з необхідними розмірами в межах допусків. Для вирішення цієї проблеми передбачається застосувати методи комп'ютерного моделювання процесу друку з наступним корегуванням моделі, за якою буде надруковано виріб [2].

Метою роботи є аналіз та оптимізація формоутворення лопатки ГТД в процесі виготовлення за адитивною електронно-променевою технологією.

У роботі задіяний програмний продукт Simufact Additive, розроблений компанією MSC Software. Це спеціалізований програмний комплекс, призначений для моделювання 3D друку деталей із металів за технологією розплавлення матеріалу в наперед сформованому шарі (Powder Bed Fusion), включаючи процеси селективного лазерного плавлення (Selective Laser Melting (SLM)), прямого лазерного спікання металів (Direct Metal Laser Sintering (DMLS)), селективного лазерного плавлення металевих порошкових матеріалів (Laser CUSING) , електронно-променевого наплавлення (Electron Beam Melting (EBM)) та ряд інших процесів [4].

Simufact Additive надає можливість:

– обчислити деформації деталі та зменшити або взагалі уникнути спотворення її форми;

– порівняти результати моделювання з еталонною формою;

– вибрати оптимальний напрямок друку;

– оптимізувати підтримуючі структури (опори);

– отримати стан деталі після термічної обробки, видалення опорної плити та підтримуючої структури;

– мінімізувати залишкові напруження.

Вирішувач MARC [5] є основою програми Simufact Additive. MARC має розвинуті можливості для проведення зв'язаного температурного і термомеханічного аналізу напружено-деформованого стану виробу при пошаровому друку, враховуючи термічні деформації і властивості матеріалу в залежності від температури.

Для проведення розрахунків використовують спеціальний генератор воксельної сітки. Вокселі – це елементарні осередки, з яких складається досліджувана модель виробу. Створюється регулярна сітка, яка використовується для моделювання пошарового друку деталі. У вирішувачі MARC додана можливість послідовної активізації воксельних шарів. Також додані нові методи моделювання

Матвійчук В.А. – https://orcid.org/0000-0002-9304-6862
© В.А. Матвійчук, 2024

процесу різання, які необхідні для моделювання процесу видалення опорної пластини та підтримуючої структури.

У Simufact Additive використовується два підходи для оперативного розрахункового визначення деформацій виробу під час друку [4]: за наближеним методом усадки (Mechanical inherent strain approach) у рамках механічної задачі теорії пружності або в результаті проведення більш загального зв'язаного аналізу термопластичного деформування матеріалу виробу в процесі друку при допущенні однакового спрощеного термічного циклу друку кожного вокселя.

Перший підхід оснований на визначенні функції усадки (залишкових пластичних деформацій) від друку окремого елементарного об'єму (вокселя) у залежності від технологічних параметрів пошарового формування виробу шляхом експериментального калібрування вказаних деформацій на стандартному надрукованому зразку типу балки обмеженого розміру. Кінетика нагріву виробу під час друку не розраховується, залишкові деформації і напруження визначаються в результаті розв'язку задачі механічного навантаження скінченно-елементної моделі виробу додатковими деформаціями усадки для кожного надрукованого вокселя, що дозволяє суттєво скоротити час розрахунку при збереженні достатньої з інженерної точки зору точності.

Другий розрахунковий підхід є більш загальним, він заснований на проведенні зв'язаного температурного та термомеханічного аналізу під час пошарового друку виробу. Але для скорочення часу на розрахунок використовується припущення про однаковий (спрощений) термічний цикл для кожного вокселя надрукованого матеріалу, що дозволяє не проводити аналіз задачі нестаціонарної теплопровідності для всієї моделі в процесі друку. У результаті розрахунку за цим підходом визначається приблизна кінетика нагріву, а також напружень і деформацій виробу.

З метою компенсації залишкових деформацій виробу можливий експорт моделі деформованої геометрії з будь-яким масштабним множником. Таким чином, можна підібрати таку вихідну форму деталі, яка після процесу друку дає мінімальне відхилення від необхідної форми, компенсуючи деформації, які виникають при створенні цієї деталі [3].

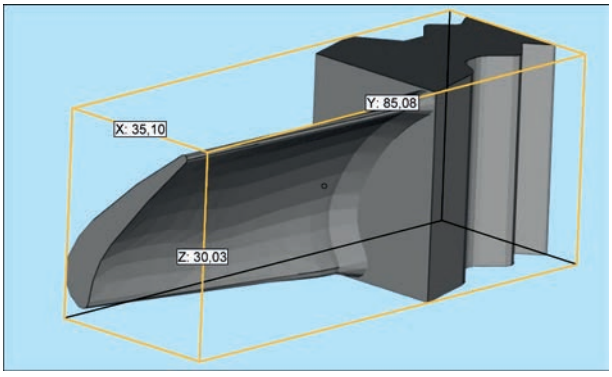


Рис. 1. Модель статорної лопатки ГТД

Із застосуванням програмного продукту Simufact Additive можливо визначити вплив технологічних параметрів друку на параметри кінцевого виробу та прогнозувати деформації форми деталі. У роботі була застосована модель лопатки газотурбінного двигуна (ГТД) (рис. 1).

З використанням програмного продукту Materialise Magics згенеровано технологічні опори для подальшого друку виробу. Були задіяні декілька просторових положень деталей, які надані на рис. 2.

Моделі рис. 2, *а* і рис. 2, *б* забезпечують найменший час побудови виробу в процесі друку. Модель рис. 2, *в* надає можливість розташувати на платформі принтера та надрукувати найбільшу кількість деталей за один виробничий цикл.

Файли моделей виробу та технологічних опор в форматі STL експортовані до програми Simufact Additive.

Подальші дії спрямовані на оптимізацію геометричної форми деталі та отримання інформації щодо впливу технологічних параметрів на формування виробів та їх властивості.

В інтерфейсі Simufact Additive створений проєкт, задані налаштування, де зазначені параметри устаткування і технологічного процесу, матеріали

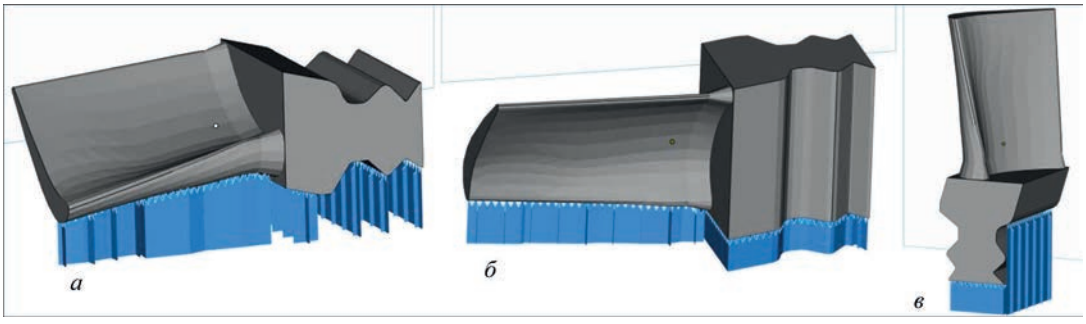


Рис. 2. Моделі виробу з технологічними опорами

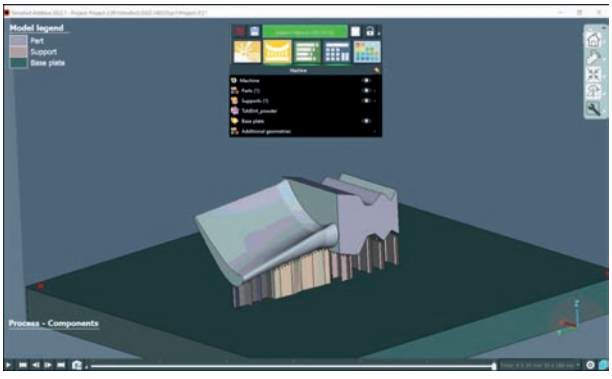


Рис. 3. Інтерфейс програми Simufact Additive з інтегрованою моделлю лопатки ГТД

деталі та платформи, імпортовані моделі виробу разом з технологічними опорами (рис. 3).

Технологічні параметри: потужність, швидкість і діаметр електронного променя, товщина шару порошку, метод сканування, термічні характеристики друку задані в налаштуваннях інтерфейсу у вкладниці Build-Propertes.

Надалі програмно згенеровано вокселі – елементарні осередки, з яких складається модель виробу, що досліджується (рис. 4).

Наступним кроком проведено моделювання пошарового друку виробу. Графічний інтерфейс Simufact Additive, де відображено процес друку, наданий на рис. 5.

Деформації усадки визначались за іншим, більш загальним підходом до аналізу термопластичного деформування матеріалу. Тобто процедура калібрування деформацій усадки для вокселей матеріалу не проводилась, а виконувався аналіз кінетики температурної задачі нагріву виробу при пошаровому формуванні і зв'язаний термопластичний аналіз визначення напружено-деформованого стану.

Колір відповідає значенню температур виробу, технологічних опор та платформи на кожному з етапів симуляції друку. Кольорову палітру з показниками температури надано на рис. 5 у таблиці Temperature.

За результатами моделювання отримано файл (рис. 6), де обчислені відхилення розмірів лопатки ГТД від еталонної моделі. Відхилення розмірів виникають внаслідок деформації форми виробу в процесі друку. Значення можливих деформацій відповідають кольору та надані на палітрі в таблиці Total displacement.

Наступний етап досліджень – корегування моделі, обчислення просторових деформацій скоригованої моделі та її порівняння з еталонною моделлю.

Корегування моделі лопатки ГТД для компенсації просторових деформацій здійснюється в меню Shape comparison програми Simufact Additive. Модель, яка отримана за результатом симуляції адитивного процесу, порівнюється з еталонною моделлю. В інтерфейсі програми за кольоровою

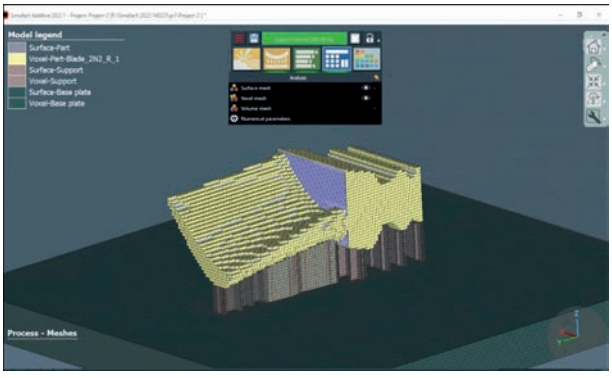


Рис. 4. Створення елементарних осередків – вокселей

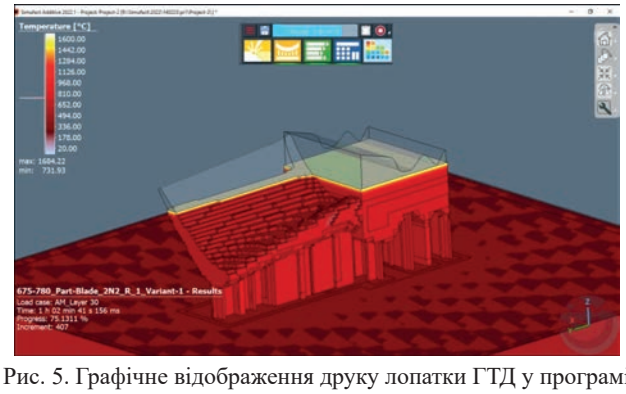


Рис. 5. Графічне відображення друку лопатки ГТД у програмі Simufact Additive

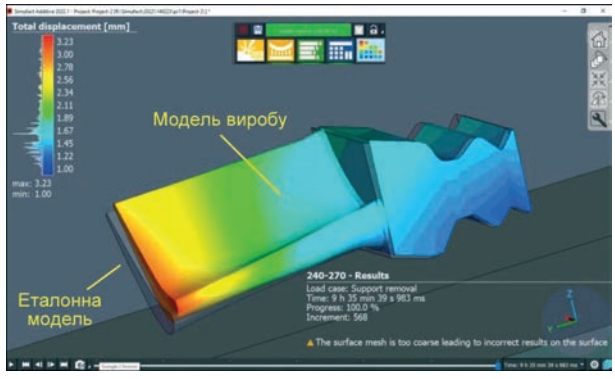


Рис. 6. Відхилення розмірів моделі надрукованого виробу від еталонної моделі

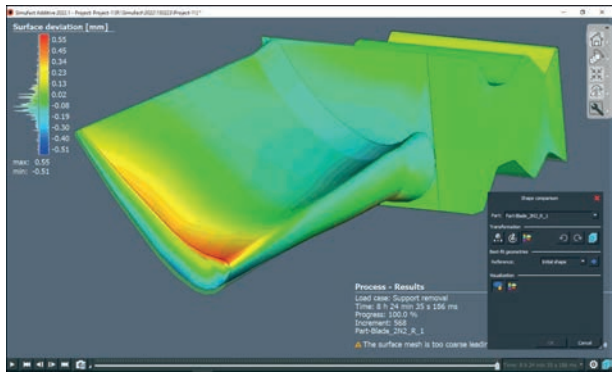


Рис. 7. Меню Shape comparison програми Simufact Additive

палітрою відображається відхилення розмірів скорегованої моделі від еталонної (рис. 7).

Надалі модель, що отримана, програмно обробляється. Створюється новий файл з урахуванням оптимізації форми. Процес симуляції друку послідовно повторюється. Створюється наступна модель лопатки ГТД, яка порівнюється з еталонною.

У разі невідповідності отриманої моделі еталонної в межах допусків, процес повторюється. Відхилення розмірів надрукованих виробів від еталонної моделі не має перевищувати ± 0,3 мм.

Файл скорегованої моделі експортується в форматі stl та приймається для друку.

Порівнюючи еталону (базову) та оптимізовану моделі лопатки ГТД можна зазначити, що лінійні розміри остаточної моделі виробу збільшені від значень (35,1; 85,08; 30,03) мм за координатами X,Y,Z до значень (35,69; 85,378; 30,411) мм. Тобто модель збільшена з урахуванням компенсації усадкових явищ та інших чинників, які призводять до деформації форми виробу в процесі друку.

Вплив технологічних параметрів на форму виробів. У дослідженнях застосовано технологічні параметри друку виробів із порошків титанового сплаву Ti–6Al–4V ELI, які визначені в [6] та наведені в табл. 1.

Для симуляції друку виробів, наданих на рис. 2, *а*, у програмі Simufact Additive створено три проєкти з різними технологічними параметрами. У кожному проєкті визначені просторові деформації та відхилення розмірів лопатки ГТД у процесі друку, які відрізняються залежно від технологічних параметрів друку (табл. 2).

Просторові деформації для кожного із технологічних режимів є індивідуальними, тому потрібно провести дослідження друку кожного з виробів, наданих на рис. 2, для всіх режимів, зазначених в табл. 1. Потім провести корегування форми виробів і отримати остаточні моделі лопатки ГТД. Створені моделі будуть придатні для подальшого друку.

Оптимізація цифрових моделей лопатки ГТД. Із застосуванням програмного продукту Simufact Additive отримано оптимізовані комп'ютерні моделі лопатки ГТД відповідно до застосованих технологічних режимів друку та просторового положення деталей. Результати моделювання надані в табл. 3.

Оптимізовані моделі збірки виробів у складі з технологічними опорами експортуються в форматі stl і придатні для подальшого друку.

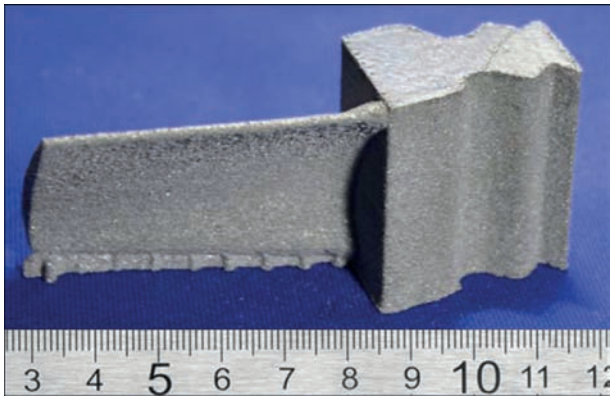


Рис. 8. Лопатка ГТД

Таблиця 1. Технологічні параметри друку виробів

Номер виробу	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, мм/с	Зміщення траєкторії, мм	Товщина шару, мм	Густина енергії, Дж/мм^3
1	240	270	0,2	0,1	44,4
2	495	540	0,2	0,1	45,8
3	675	780	0,2	0,1	43,3

Таблиця 2. Значення просторових деформацій

Номер виробу	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, мм/с	Відхилення розмірів, мм	
			від	до
1	240	270	1,00	3,23
2	495	540	0,97	2,85
3	675	780	0,98	2,70

Таблиця 3. Результати оптимізації моделей лопатки ГТД

Номер виробу	Просторове положення за рис. 2	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, мм/с	Відхилення розмірів, мм	
				від	до
1	*а*	240	270	–0,03	0,13
2	*а*	495	540	–0,02	0,08
3	*а*	675	780	–0,03	0,09
4	*б*	240	270	–0,05	0,11
5	*в*	240	270	–0,26	0,14
6	*в*	495	540	–0,25	0,14
7	*в*	675	780	–0,25	0,13

Таблиця 4. Розміри цифрової моделі та виробу «Лопатка ГТД»

Параметр	Цифрова модель, мм	Надрукований виріб, мм	Розбіжність, мм	Допуск, мм	Позначка про відповідність
Висота	35,1	35,21	0,11	±0,3	Відповідає
Ширина	30,03	30,16	0,13	±0,3	Відповідає
Довжина	85,08	85,06	–0,02	±0,3	Відповідає

Виготовлення та дослідження геометрії лопатки ГТД. За оптимізованою комп'ютерною моделлю (рис. 2, *б*) відповідно до заданих технологічних параметрів (табл. 1, виріб № 2) методом адитивного електронно-променевого наплавлення виготовлено лопатки ГТД (рис. 8).

Проведено аналіз формоутворення виробу. Геометричні розміри еталонної комп'ютерної моделі та надрукованого виробу «Лопатка ГТД» надані в табл. 4.

Визначено, що за розмірами надрукована лопатка ГТД відповідає цифровій моделі. За результатами розрахунку при використанні оптимізованих моделей відхилення геометричних розмірів надрукованих лопаток не перевищує допусків на розмір виробу ± 0,3 мм.

Висновки

У межах технологічної підготовки до адитивного виробництва дослідних зразків робочих лопаток ГТД проведено комп'ютерну симуляцію друку із застосуванням програмного продукту Simufact Additive і порівняння отриманих результатів з еталонною моделлю. Отримано оптимізовані комп'ютерні моделі лопатки ГТД з урахуванням просторових деформацій, які виникають в процесі друку. За результатами розрахунку при використанні оптимізованих моделей відхилення геометричних розмірів надрукованих лопаток не перевищує допусків на розмір виробу ± 0,3 мм.

Список літератури/References

1. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding J.*, **3**, 7–14. DOI: https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.02
2. Sahini, D.K., Ghose, J., Jha, S.K., Behera, A., Mandal, A. (2020) *Optimization and simulation of additive manufacturing processes: challenges and opportunities – A review. In book: Additive Manufacturing Applications for Metals and Composites*, 187–209. DOI: https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4054-1.ch010
3. Derrer, J.P. et al. (2022) *Simufact engineering provides the green team & renishaw with a complete AM process simulation solution. SIMUFACT Case study*. https://enteknograte.com/wp-content/uploads/2022/06/hexagon_mi_simufact_casestudy_renishaw_a4_en_screen.pdf
4. *Simufact additive*. https: //hexagon.com/products/simufact-additive.
5. *MSC. Marc volume A: Theory and user information*. https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/msc-marc-volume-a--theory-and-user-information-doc9245.
6. Matviichuk, V., Nesterenkov, V, Berdnikova, O. (2022) Determining the influence of technological parameters of the electron-beam surfacing process on quality indicators. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **1**, 21–30. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253473

COMPENSATION OF SPATIAL DEFORMATION OF PARTS AT ADDITIVE ELECTRON-BEAM SURFACING

V.A. Matviichuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.11 Kazymyr Malevych St., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: matviychuk@technobeam.com.ua

The aim of the work is to analyze and optimize the shaping of a GTD blade in the process of manufacturing using additive electron beam technology. Using the method of computer simulation in the Simufact Additive software, the influence of technological parameters of printing on the product shaping was investigated, and the shrinkage phenomena that occur during the printing process were analyzed. Printing simulation was performed and the results were compared with the reference model. The optimized computer models of GTD blades were created. According to the calculation results, when using the optimized models, the deviation of the geometric dimensions of the printed blades does not exceed the product size tolerances of ± 0.3 mm. 6 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: additive technologies, electron beam, surfacing, simulation, shaping, 3D printer

Отримано 12.06.2024
Отримано у переглянутому вигляді 14.10.2024
Прийнято 26.11.2024

НОВА КНИГА

Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. *Аргонодугове та електронно-променеве зварювання економнолегованих титанових сплавів*. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2024. — 136 с. ISBN 978-617-7785-64-3. Формат 145х200 мм, м'яка обкладинка.

Книгу можна замовити в редакції журналу «Автоматичне зварювання».

УДК 621.791.92

DOI: https://doi.org/10.37434/as2024.06.06

ВПЛИВ СТАНУ ПОВЕРХНІ НА ОПІР ВТОМИ ЗРАЗКІВ З ОТВОРОМ ЗІ СПЛАВУ ВТ22 ПРИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОМУ НАПЛАВЛЕНІ

А.О. Горпенко, О.І. Семенець

АТ «АНТОНОВ». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполєва, 1. E-mail: timanz.ag@gmail.com

Досліджено шість зразків з отвором, які були виготовлені з високоміцного титанового сплаву ВТ22 та пройшли втомні випробування. Дослідження проводилися на зразках, поверхня яких була відновлена методом дугового наплавлення в середовищі інертних газів під впливом зовнішнього магнітного поля з використанням присадного дроту зі сплаву СП15св. Отримані результати підтверджують значне поліпшення структури нанесеного шару та зниження негативного впливу дефектів зварювання. Подальша локальна термічна обробка (ЛТО) значно покращила механічні властивості зразків у зоні наплавлення. Зразки групи 2, які мали відносно рівномірну мікротвердість у зоні термічного впливу (ЗТВ), після ЛТО продемонстрували високу стійкість до руйнування, на відміну від зразків групи 1, які мали значні коливання мікротвердості в ЗТВ. Недотримання режимів ЛТО зразків групи 1 призвело до зменшення напрацювань у шість разів порівняно з групою 2. Виявлені поверхневі дефекти отворів групи 1 негативно вплинули на швидкість ініціювання тріщин. Отримані результати підтверджують важливість дотримання встановлених параметрів наплавлення, кінцевої обробки деталей і режимів ЛТО для підвищення ефективності та надійності процедури відновлення. Бібліогр. 11, табл. 5, рис. 11.

Ключові слова: високоміцний титановий сплав ВТ22, поверхневі дефекти, наплавлення, зона термічного впливу, циклічне навантаження

Вступ. Титан і його сплави є важливим матеріалом для авіаційної промисловості, оскільки вони поєднують у собі високу міцність (α+β)-сплави, які після термічної обробки в середньому мають міцність в межах 1100...1150 МПа), низьку густину (4,5 г/см^3), відмінну корозійну стійкість і здатність працювати при підвищених температурах [1–3]. Одним із найпоширеніших титанових сплавів, що застосовуються для виготовлення силових елементів літаків «Ан», є сплав ВТ22, який має високу міцність як у відпаленому, так і у термічно зміцненому стані [4]. Проте цей сплав має недолік – низькі антифрикційні властивості, що сприяє інтенсивному зношуванню поверхні деталей під час тертя. Цей недолік обумовлений значною пластичною деформацією, що прискорює руйнування оксидних плівок, а також активними окислювальними та дифузійними процесами, які відбуваються в поверхневих шарах деталей, що труться [5]. Також треба враховувати вплив дифузії газів з навколишнього середовища на характер тертя та зношування титану, який є хімічно активним металом з низькою теплопровідністю. У зв'язку з цим зносостійкість титанових сплавів в умовах тертя визначається не тільки вихідними характеристиками їхньої структури, а й вторинними властивостями, що формуються в процесі контактної взаємодії.

Зношені деталі літаків, що мають критичний вплив на безпеку польотів, зазвичай замінюються на нові, що призводить до збільшення витрат на ремонт та обслуговування. Тому актуальним є пошук ефективних методів відновлення пошкоджених ділянок поверхні деталей з титанових сплавів.

Одним із таких методів є наплавлення з використанням присадних дротів, який дозволяє створити новий шар матеріалу на поверхні деталі за допомогою електричного дугового розряду [6]. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розробив технологію відновлення поверхні пошкоджених деталей методом наплавлення з використанням присадних дротів зі сплавів СП15св і ВТ22 у захисному середовищі інертних газів із застосуванням зовнішнього магнітного поля [7, 8]. Ця технологія була частково апробована на АТ «АНТОНОВ», де було відновлено поверхню габаритної деталі літака Ан-124 з титанового сплаву ВТ22, яка мала локальний знос на глибину більше 1,5 мм. Для покращення механічних властивостей відновленої деталі було застосовано локальну термічну обробку, яка полягала в швидкому нагріві до температур однофазного β-розчину та подальшому короткочасному відпалі [9–11].

Для вивчення впливу відновлювальної технології на втомні показники високоміцного титанового сплаву ВТ22 були виготовлені зразки з центральним отвором у наплавленому шарі, які були зруйновані під час проведення втомних випробувань.

Мета даної роботи полягала у дослідженні впливу технології місцевого відновлення поверхні зразків зі сплаву ВТ22, що пройшли локальну термічну обробку, на швидкість і характер заро-

© А.О. Горпенко, О.І. Семенець, 2024

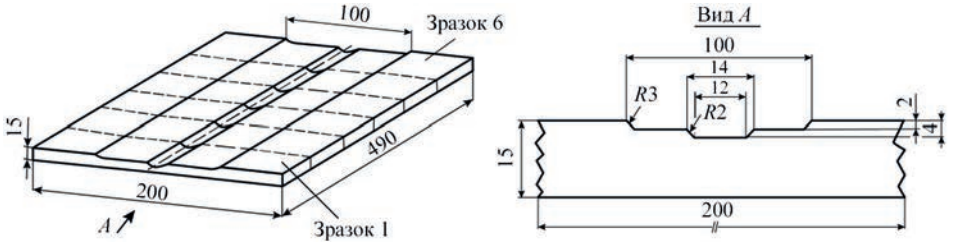


Рис. 1. Схема вирізки зразків і подальшої обробки поверхні для проведення відновлювального наплавлення

Таблиця 1. Параметри режиму наплавлення дослідних зразків

Параметри наплавлення	Значення
Струм зварювання, А	260
Напруга дуги, В	11,5
Швидкість наплавлення, м/г	5,5
Швидкість подачі дроту, м/г	46
Частота керуючого магнітного поля, Гц	20
Магнітна індукція керуючого магнітного поля, мТл	7,8

дження тріщин під час проведення випробувань на втому та у встановлені причин великої розбіжності кінцевих напрацювань зразків, поверхня яких була відновлена з використанням дроту СП15св (Ti–4,5Al–2,5Mo–2,5V–3,5Nb–1,5Zr).

Матеріали та методи досліджень. Для проведення втомних випробувань у плиті завтовшки 15 мм було виконано фрезерування для подальшого виготовлення шести стандартних зразків типу «лопатка». У центральній частині плити також додатково було знято поверхневий шар завглибшки 1...1,5 мм (рис. 1, *а*), що імітувало зношену поверхню реальних деталей, у межах якої було виконано відновлювальне наплавлення присадним дротом СП15св у середовищі аргону. Параметри режиму наплавлення підбиралися з урахуванням мінімізації глибини проплавлення та ЗТВ при заданій ширині наплавлення. Для регулювання цих параметрів використовували зовнішнє змінне магнітне поле, що дозволило керувати процесом формування шару. Розміри зразків і параметри режиму наплавлення наведенні в табл. 1 і на рис. 1 відповідно.

Наявність наплавленого шару в зразках неминуче супроводжується значним погіршенням усього комплексу механічних властивостей. Тому плита в подібному наплавленому стані була піддана локальній термічній обробці (ЛТО) у центральних зонах зразків. Для проведення ЛТО була використана експериментальна установка, що дозволяє проводити нагрів зразків завтовшки 10...12 мм одночасно з двох сторін. Швидкісний СВЧ нагрів під гартування до 900 ± 15 ºС та охолодження на повітрі дав змогу прибрати макро- і мікроструктурну неоднорідність, що спостерігалася у вихідному наплавленому стані, а також нівелювати початкову відмінність у твердості. Під час гартування найпроблемішна зона термічного впливу (ЗТВ) була піддана фазовій перекристалізації, за рахунок чого вдалося знизити залишкові напруження до рівня, близького до відпаленого стану. Застосування подальшого СВЧ-відпалу, а саме, нагрів до температури 600 ºС і витримка 20 хв, призвело до того, що як у матеріалі наплавлення, так і в ЗТВ утворився стабільний двофазний (α+β)-стан, який, незважаючи на деяке збільшення мікротвердості в перехідній зоні, характеризувався низьким рівнем залишкових напружень.

Після проведення наплавлення та ЛТО було виконано вирізку та кінцеву обробку шести зразків типу «лопатка». Також після обробки в центральній зоні всіх зразків був виконаний отвір діаметром 6 мм з необхідною шорсткістю поверхні на рівні R_a = 0,8 мкм (рис. 2).

Випробування зразків здійснювали на гідравлічній машині УИМ-25 до їх повного руйнування з нульовим циклом (R = 0) з частотою 3 Гц з навантаженнями $P_{max\ розтяг.} \approx 90$ кН та $P_{max\ стиск.} \approx 60$ кН. Для зручності обробки отриманих результатів зразки були розділені на дві групи у відповідності до їх напрацювань. У першу групу ввійшли три зразки, що мали напрацювання менше 5000 циклів, у другу – більше 5000 циклів (табл. 2).

Структуру та поверхню руйнування зразків вивчали за допомогою оптичного (Neophot-21) і скануючого (TESCAN VEGA 3) мікроскопів. Мікротвердість зразків визначали методом інструментального індентування за Вікерсом (HV) на

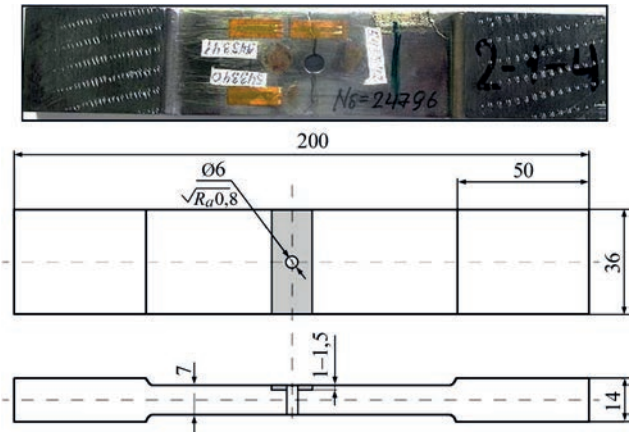


Рис. 2. Зовнішній вигляд і схема зразка з відновленою поверхнею, що пройшов втомні випробування

Таблиця 2. Напрацювання зразків після проведення втомних випробувань

Номер зразка		*N*, цикл.
Група 1	1	3132
	2	4482
	3	4455
Група 2	4	24796
	5	19192
	6	19086

мікротвердомірі QNESS 60A+EVO при навантажені 0,3 Н. Шорсткість поверхні визначали за допомогою приладу Surftest SJ-400.

Результати експериментів та їх обговорення. При дослідженні на оптичному мікроскопі на поверхні отворів першої групи зразків спостерігалися риски та забоїни (рис. 3). Поверхня отворів зразків другої групи мала згладжений рельєф, без явно виражених поверхневих дефектів (рис. 4). Згідно з проведеними вимірюваннями шорсткості поверхні було встановлено, що шорсткість поверхні отворів першої групи зразків не відповідає вимогам креслення, на поверхні отворів фіксувалися риски завглибшки 5,3...25 мкм. Шорсткість поверхні отворів другої групи зразків відповідала вимогам креслення, на поверхні зразків 5 і 6 фіксувались риски завглибшки до 4,1 мкм. У табл. 3 наведено результати виконаних вимірювань.

Також було виявлено незначні відхилення у кінцевих розмірах наплавленого прошарку та глибини ЗТВ, що могли вплинути на кінцеві значення напрацювань зразків під час проведення втомних випробувань. У табл. 4 наведено середні значення розмірів цих зон.

При макрофрактографічному дослідженні встановлено, що руйнування всіх зразків має змішаний характер. У кожному зразку виявлено по дві тріщини, що розвинулись від поверхні отворів у районі ЗТВ. У зоні наплавленого шару фіксувалась незначна кількість пор, що утворились під час ремонтного наплавлення присадним дротом СП15св, діаметр яких для більшості зразків не перевищував 0,1 мм. Тільки зразок 3 мав одиничну пору діаметром ~ 0,25 мм, яка розташовувалась у середині зламу. По краях зламів спостерігалися так звані губи зрізу, що можуть утворюватися в зоні остаточного руйнування зразків.

У процесі дослідження зразків групи 1 було встановлено, що їх характер руйнування відповідає повторно-статичному механізму. Макрорельєф тріщин мав грубокристалічну будову. Поблизу отворів і біля зони наплавлення спостерігалися також ділянки зі струмковим візерунком, характерним для

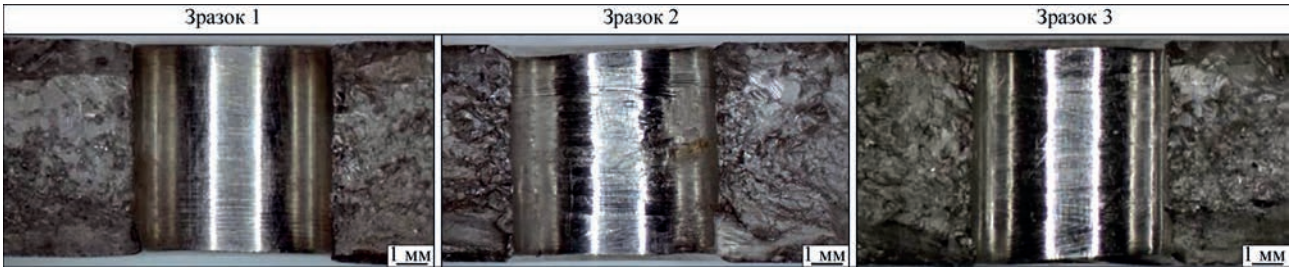


Рис. 3. Зовнішній вигляд отвору зразків групи 1

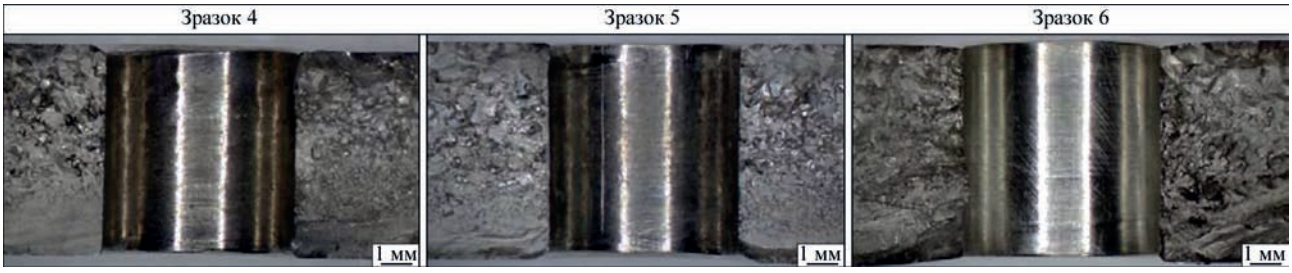


Рис. 4. Зовнішній вигляд отвору зразків групи 2

Таблиця 3. Стан поверхні отвору зразків після втомного руйнування

Номер зразка	Шорсткість поверхні отвору за параметром R_a	Глибина рисок в отворі, мкм
1	0,86...1,15	max 6,2
2	3,12...4,07	16,8...25
3	0,63...0,89	max 5,3
4	0,27...0,29	–
5	0,7...0,77	max 4,1
6	0,36...0,53	max 3,3

Таблиця 4. Середні значення зон, що утворилися під час відновлювального наплавлення

Номер зразка	*N*, цикл.	Середня глибина нанесеного шару, мм	Середня глибина ЗТВ, мм	Товщина зразка, мм
1	3132	1,3	4	6,7
2	4482	1,2	4,2	6,9
3	4455	1,3	3,9	6,8
4	24796	1,2	2,9	6,9
5	19192	1,2	4	6,7
6	19086	1,3	3,9	6,7

в'язкого руйнування, кількість і розміри яких значно зростали до кінця тріщини На рис. 5, *а* наведено знімок і схему будови зламу зразка 1 першої групи.

Дослідження зразків групи 2 показали, що поверхня зламів має ділянки малоциклової втоми та зони крихкого міжзеренного руйнування. Зародження тріщин відбувалося від поверхні отвору та біля зони наплавлення. Макрорельєф зразків складався переважно з грубокристалічних міжзеренних фасеток крихкого руйнування та плоских фасеток внутрішньозеренного руйнування. На окремих транскристалічних фасетках спостерігалися слабкі концентричні лінії втомного просування. На рис. 5, *б* наведено знімок і схему зламу зразка 5 другої групи.

Дослідження зразків на скануючому електронному мікроскопі виявило наступні особливості їх руйнування. На початкових ділянках тріщин зразків групи 1 спостерігався переважно крихкий мікрорельєф, що чергувався з невеликими ділянками ямкового мікрорельєфу. Крихке руйнування переважно починалось від поверхневих дефектів отвору та відбувалось як інтеркристалітно по межах β-зерен, так і транскристалітно за елементами структури (рис. 6). Наприкінці тріщин поряд із переважаючим ямковим мікрорельєфом виявлялася невелика кількість фасеток крихкого руйнування.

У процесі дослідження було встановлено, що зразки групи 2 мають змішаний характер руйнування: повторно-статичний (малоциклова втома) і крихкий міжзерений. Зародження тріщин відбувалось від поверхні отвору (рис. 7). На окремих транскристалітних фасетках спостерігалися слабкі концентричні лінії втомного просування (рис. 8).

Для встановлення впливу ЛТО на кінцеву структуру та механічні властивості зразків було виготовлено шліфи у висотному напрямку. Виконано вимірювання мікротвердості всіх зразків у

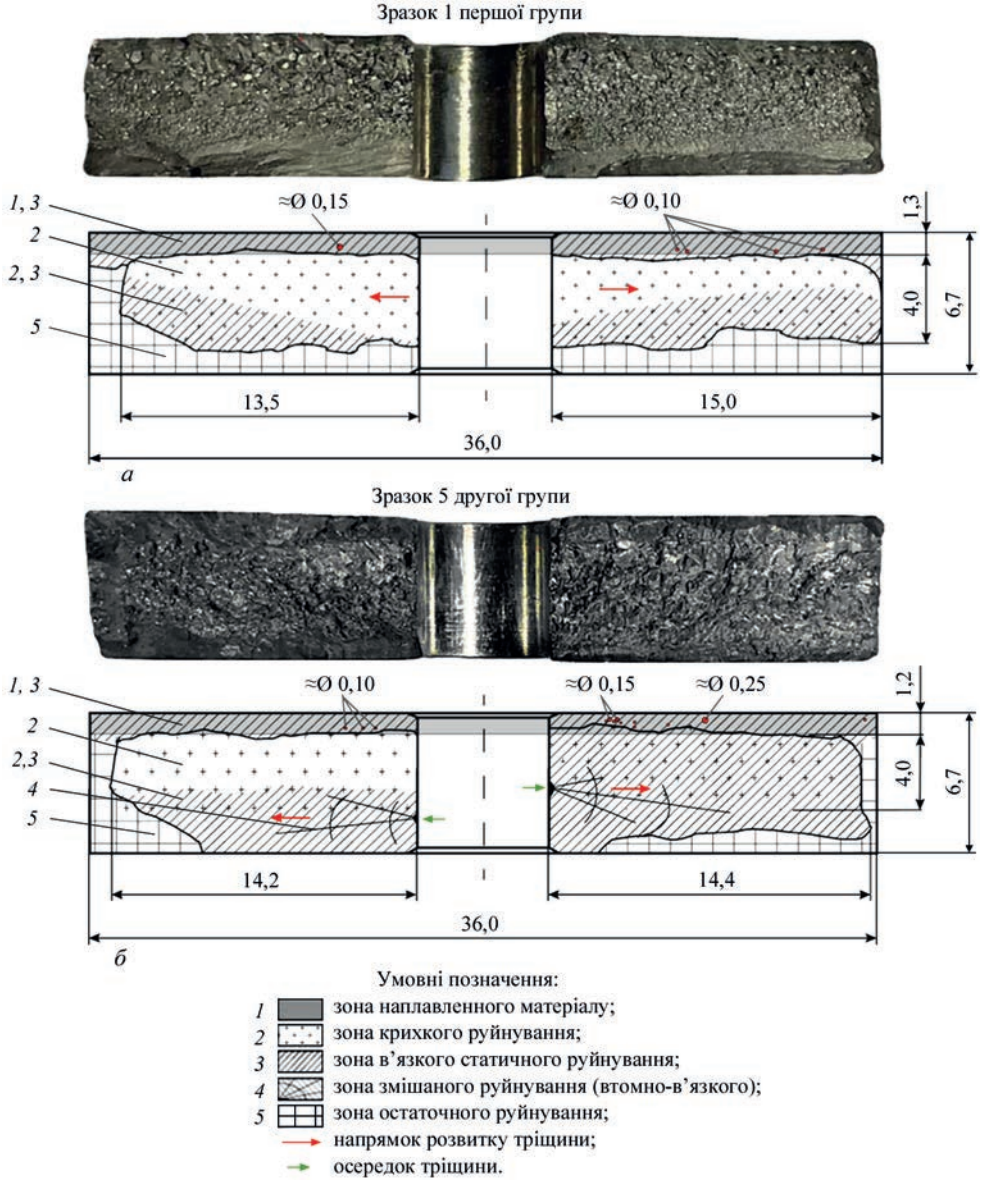


Рис. 5. Зовнішній вигляд і схема будови зламів зразків 1 (*а*), 5 (*б*)

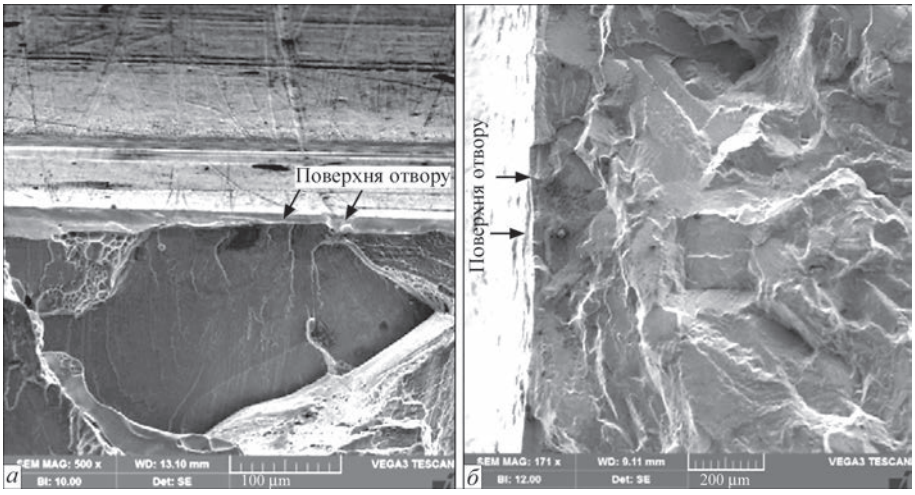


Рис. 6. Вид осередків тріщин зламів зразків 1 (*а*), 2 (*б*)

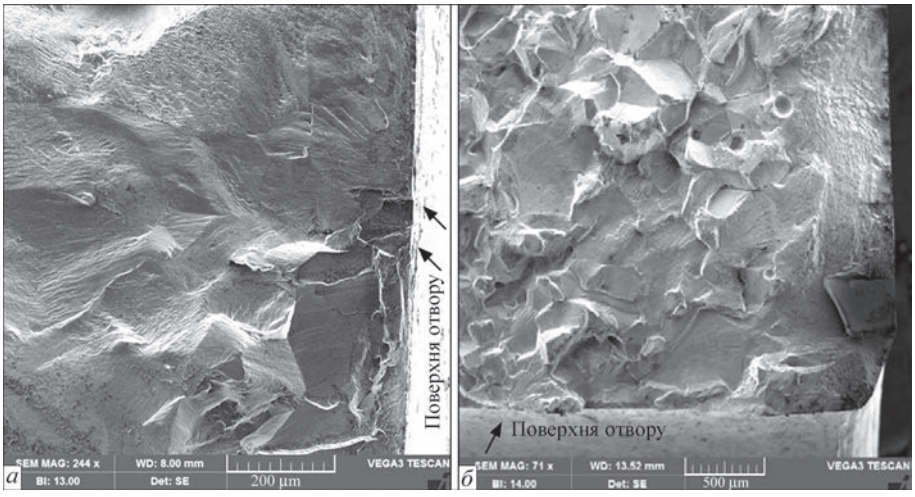


Рис. 7. Вид осередків тріщин зламів зразків 4 (*а*), 5 (*б*)

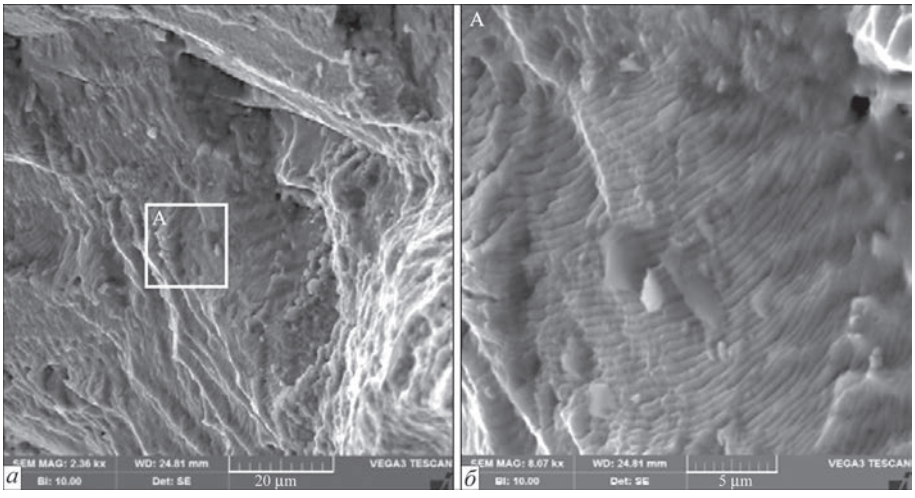


Рис. 8. Вид втомного мікрорельєфу зразка 6

трьох напрямках: у наплавленому шарі, ЗТВ та в основному металі. Отримані результати наведено в табл. 5.

Згідно з проведеними дослідженнями мікрошліфів були отримані наступні результати: зона наплавлення всіх зразків складалася з великих витягнутих β-зерен (500...600 мкм), орієнтованих у напрямку тепловідведення, з відманштетовою структурою, яка утворилася внаслідок дифузійного перетворення в β-титані після ЛТО. Частина мартенситної α’-фази, що утворилася під час гартування, частково розклалася, утво-

Таблиця 5. Середні значення мікротвердості зон, що утворилися під час наплавлення

Зона контролю	*H*, мм	Середні значення мікротвердості зразків, HV					
		Група 1			Група 2		
		1	2	3	4	5	6
Наплавлений шар	0,5	389±7,8	399±13,4	413±21,4	362±12,9	367±7,8	364±4,6
Зона термічного впливу	2	314±9,7	422±6,9	409±13,0	408±11,6	415±8,8	380±13,9
	3,5	314±11,6	418±14,8	431±20,6	408±20,8	409±5,1	384±12,3
	5	313±6,7	435±13,1	405±9,0	418±14,6	415±12,5	405±4,4
Основний метал	6	363±18,9	427±9,4	430±11,4	415±6,7	404±13,4	416±10,8

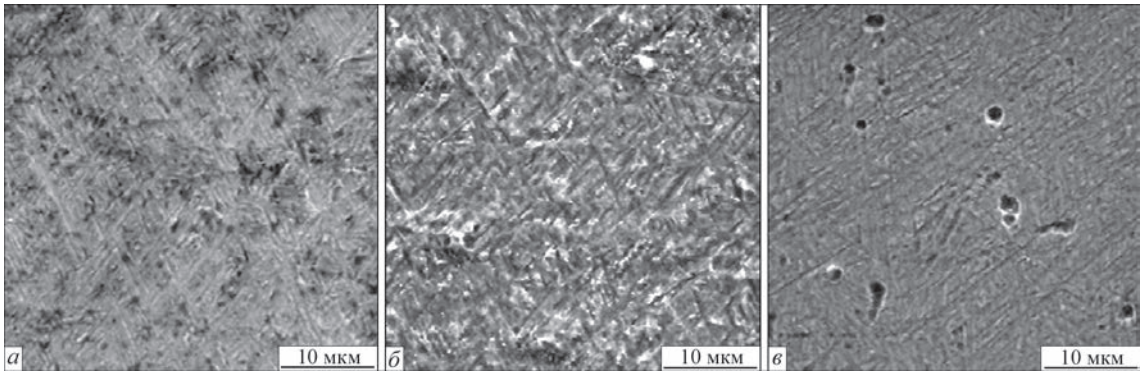


Рис. 9. Мікроструктура області наплавлення після ЛТО зразків 1 (*а*), 3 (*б*) першої групи та зразка 4 (*в*) другої групи

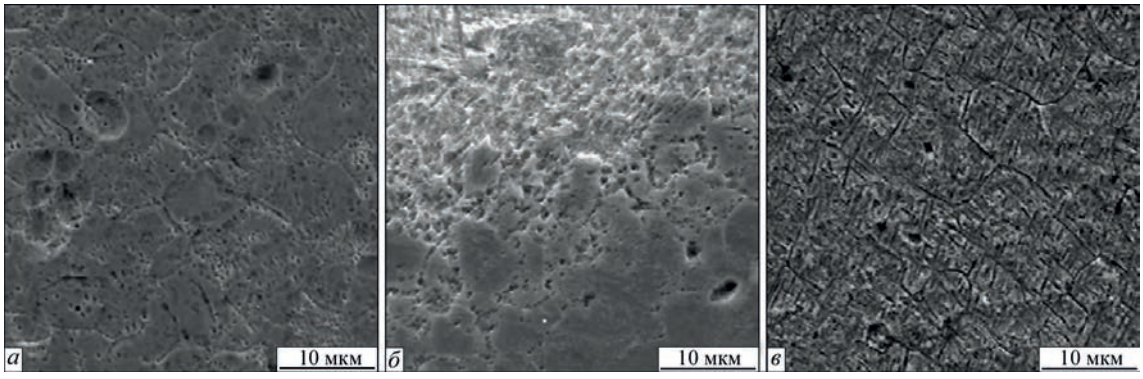


Рис. 10. Мікроструктура області ЗТВ після ЛТО: у центральній зоні зразка 1 (*а*), у перехідній зоні між наплавленням і ЗТВ зразка 3 (*б*) першої групи та в центральній зоні зразка 4 (*в*) другої групи

ривши тонкі пластини α-фази в матриці β-фази. Як видно з рис. 9, мікроструктура наплавленого шару зразків двох груп дещо відрізнялася: α-пластини в наплавленому шарі першої групи були збільшеними. Ці зміни можуть бути пов'язані зі збільшенням часу витримки під час ЛТО. Вимірювання мікротвердості наплавленого шару показали, що середні значення для першої групи зразків становлять 400 HV, а для другої групи – 360 HV.

У більшості зразків у ЗТВ після ЛТО була сформована двофазна структура, що включала α- та β-фази. Формування двофазної структури є наслідком відносно повільного охолодження зразків на повітрі під час відпалу. Це сприяло перетворенню високотемпературної β-фази, що утворилася під час гартування, у рівноважну α-фазу та залишкову матрицю β-фази. Вимірювання показали значні коливання значень мікротвердості зразків групи 1 у ЗТВ. Зокрема зразки 2 і 3 мали ділянки з підвищеною мікротвердістю на рівні 430 HV, тоді як зразок 1 мав найнижчі показники з усіх – на рівні 313 HV на всю глибину ЗТВ (рис. 11, *а*, *б*). На відміну від першої групи, друга група показала відносно рівномірні показники мікротвердості на всю глибину ЗТВ (рис. 11, *в*). Виявлені особливості можуть вказувати на температурні відхилення під час гартування, що не дозволило при подальшому відпалі розпастися високотемпературній β-фазі на двофазну. Про це також свідчить слабка травимість поверхні мікрошліфа в ЗТВ у порівнянні з іншими зразками (рис. 10).

Висновки

Проведений фрактографічний і металографічний аналіз зруйнованих під час проведення втом-

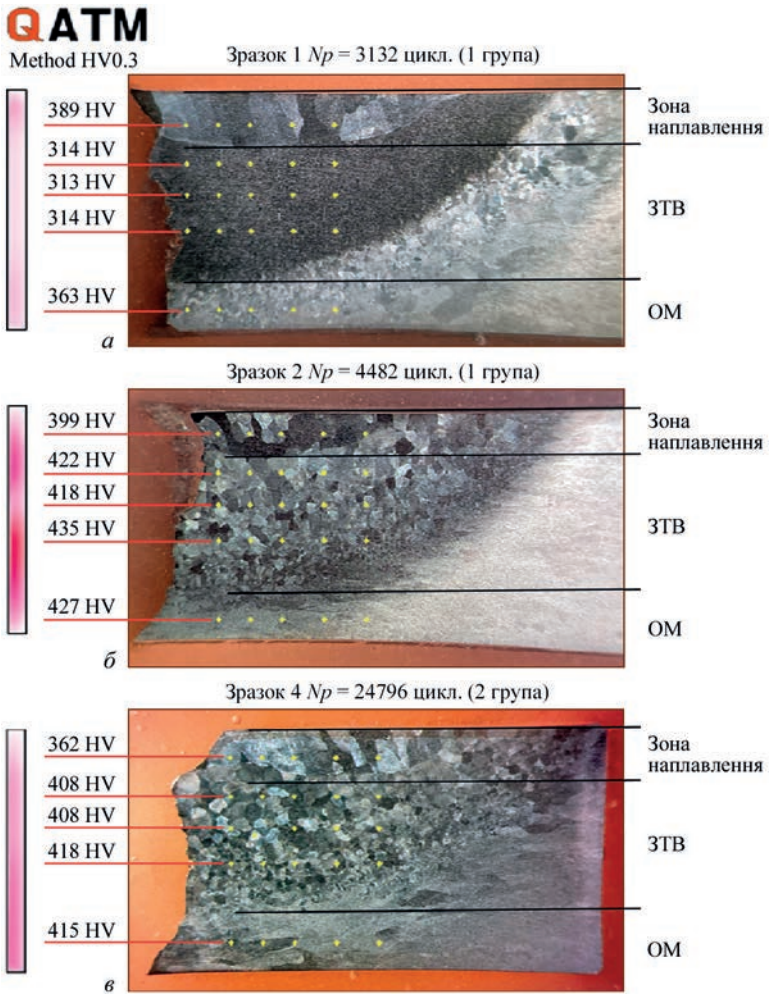


Рис. 11. Результати вимірювання мікротвердості зразків 1 (*а*), 3 (*б*) першої групи та зразка 4 (*в*) другої групи

них випробувань зразків зі сплаву ВТ22 дозволив зробити наступні висновки:

– розбіжності в кінцевих напрацюваннях зразків двох груп обумовлені тим, що зразки першої групи мали високу шорсткість поверхні отворів, що створювало додаткові концентрації напружень і сприяло швидшому зародженню тріщин. Глибокі риски та забоїни цієї групи значно знижували довговічність зразків;

– наплавлення присадним дротом СП15св у середовищі аргону під впливом зовнішнього змінного магнітного поля дозволило досягти задовільних результатів у сенсі мінімізації глибини проплавлення та ЗТВ. Незначна кількість пор (діаметр до 0,1 мм) свідчить про високу якість наплавлення. Виявлена поодинока пора діаметром до 0,25 мм не вплинула на швидкість зародження тріщини у зразку, тому що розташовувалась на значній відстані від отвору;

– ЛТО позитивно вплинула на мікроструктуру зразків, зменшивши макро- і мікроструктурну неоднорідність. Фазова перекристалізація під час гартування знизила залишкові напруження до рівня відпаленого стану. Формування двофазного (α+β)-стану після СВЧ-відпалу забезпечило стабільність механічних властивостей зразків другої групи, незважаючи на деяке збільшення мікротвердості в перехідній зоні.

У цілому, висока якість наплавлення та ефективність локальної термічної обробки позитивно вплинули на механічні властивості зразків другої групи, що забезпечило їх тривалу роботу. Натомість, перша група зразків демонструвала значні відхилення в структурі та властивостях, а наявні поверхневі дефекту отвору прискорили ініціювання тріщин, що спричинило їх швидке руйнування під час втомних випробувань.

Технологія відновлення поверхні з використанням наплавлення присадним дротом і ЛТО має великий потенціал для застосування не тільки в авіаційній промисловості, але й в оборонній сфері. Зокрема, вона може бути використана для ремонту та відновлення високонавантажених компонентів, таких як лопатки турбін, корпуси двигунів, броньовані елементи та інші критично важливі деталі. Використання цієї технології дозволяє знизити витрати на виробництво нових деталей шляхом ефективного відновлення існуючих, що може суттєво

знизити загальні експлуатаційні витрати. Крім того, відновлення деталей із використанням подальшого ЛТО сприяє покращенню надійності та бойової готовності військової техніки, що є критично важливим для забезпечення обороноздатності країни.

Список літератури

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. (1969) *Конструкционные титановые сплавы*. Москва, Металлургия.
2. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. (1990) *Титан в машиностроении*. Москва, Машиностроение.
3. Цвиккер У. (1979) *Титан и его сплавы*. Москва, Металлургия.
4. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов.* Киев, Наукова думка.
5. Войтович Р.Ф., Головко Э.И. (1984) *Высокотемпературное окисление титана и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
6. Гуревич С.М., Замков В.Н., Кушниренко Н.А. (1980) Изыскание присадочного материала для сварки (α+β)-титановых сплавов. Актуальные проблемы сварки цветных металлов. Киев, Наук. думка, сс. 314–320.
7. Прилуцкий В.П., Шваб С.Л., Петриченко И.К. и др. (2016) Аргонодуговая сварка титанового сплава ВТ-22 с использованием присадочной порошковой проволоки. *Автоматическая сварка*, **9**, 10–14. DOI: https://doi.org/10.15407/as2016.09.02.
8. Прилуцкий В.П., Ахонин С.В., Шваб С.Л. и др. (2017) Восстановительная наплавка деталей из титанового сплава ВТ-22. *Автоматическая сварка*, **1**, 39–42. DOI: https://doi.org/10.15407/as2017.01.05.
9. Markovsky, P.E. (2010) Application of local rapid heat treatment for improvement of Microstructure and mechanical properties of titanium products. *Key Engineering Mater*., **436**, 185–194. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.436.185.
10. Івасишин О.М., Марковський П.Є., Гавриш І.М., Карасевська О.П. (2014) Вплив швидкості охолодження під час гартування на старіння і формування механічних характеристик титанового сплаву ВТ-22. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **1**, 60–66.
11. Горпенко А.О., Семенець О.І. (2023) Вплив дефектів зварювання на втомні показники зразків зі сплаву ВТ-22 при застосуванні відновлювального наплавлення присадковими дротами. *Успіхи матеріалознавства*, **7**, 27–36. DOI: doi.org/10.15407/materials2023.07.003.

References

1. Glazunov, S.G., Moiseev, V.N. (1969) *Structural titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Horynin, I.V., Chechulin, B.B. (1990) *Titanium in mechanical engineering*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Zvikker, U. (1979) *Titanium and its alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and welding technology of titanium and its alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
5. Voytovich, R.F., Holovko, E.I. (1984) *High-temperature oxidation of titanium and its alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Kushnirenko, N.A. (1980) *Refinement of additive material for welding (α+β)-titanium alloys. Current problems of non-ferrous metals*. Kyiv, Naukova Dumka, 314–320 [in Russian].
7. Prilutsky, V.P., Schvab, S.L., Petrichenko, I.K., Akhonin, S.V., Rukhansky, S.B., Radkevich, I.A. (2016) Argon arc welding of titanium VT22 alloy using filler flux-cored wire. *The Paton Welding J.,* **9**, 9–13 DOI: https://doi.org/10.15407/tpwg2016.09.02 [in Russian].
8. Prilutsky, V.P., Akhonin, S.V., Schvab, S.L., Petrichenko, I.K., Radkevich, I.A., Rukhansky, S.B., Antonyuk, S.L. (2017) Restoration surfacing of parts of titanium alloy VT22. *The Paton Welding J.*, **1**, 39–42 DOI: https://doi.org/10.15407/tpwg2017.01.05 [in Russian].
9. Markovskyi, P.E. (2010) Application of local rapid heat treatment for improvement of microstructure and mechanical properties of titanium products. *Key Engineering Mater.,* **436**, 185–194. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.436.185.
10. Ivasyshyn, O.M., Markovskyi, P.E., Havrish, I.M., Karasevska, O.P. (2014) Effect of cooling rate during quenching on aging and formation of mechanical characteristics of titanium alloy VT22. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialov*, **1**, 60–66 [in Ukrainian].
11. Horpenko, A.O., Semenets, O.I. (2023) The influence of welding defects on the fracture mechanism of samples made of the VT-22 alloy, with the use of restorative surfacing with filler wires. *Uspihy Materialoznavstva*, **7**, 27–36. DOI: https://doi.org/10.15407/materials2023.07.003 [in Ukrainian].

INFLUENCE OF THE CONDITION OF THE SURFACE ON THE FATIGUE RESISTANCE OF SAMPLES WITH HOLE FROM VT22 ALLOY AT RESTORATIVE SURFACING

A.O. Gorpenko, O.I. Semenets

«ANTONOV COMPANY». 1 Acad. Tupolev Str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: timanz.ag@gmail.com

Six samples with holes made from high-strength titanium alloy VT-22, which have passed fatigue tests, were studied. The tests were conducted on samples whose surfaces were restored by inert-gas arc surfacing using SP-15 alloy filler wire. Obtained results confirm a significant improvement in the deposited layer structure and a reduction in the negative impact of welding defects. Subsequent local heat treatment (LHT) markedly enhanced the mechanical properties of the samples in the weld zone. Samples of Group 2, which had relatively uniform microhardness in the heat-affected zone (HAZ), after LHT demonstrated high resistance to failure, unlike samples of Group 1, which showed significant microhardness variations in the HAZ. Non-compliance with LHT modes for Group 1 samples resulted in six times reduction in service life compared to Group 2. The detected surface defects of the holes in Group 1 samples negatively affected the crack initiation rate. The obtained results emphasize the importance of adhering to specified parameters of surfacing, final part treatment, and LHT modes to enhance the efficiency and reliability of the restoration procedure. 11 Ref., 5 Tabl., 11 Fig.

Keywords: high-strength titanium alloy VT-22, surface defects, surfacing, heat-affected zone, cyclic loading

Отримано 21.06.2024
Отримано у переглянутому вигляді 11.09.2024
Прийнято 22.10.2024

Автоматичне Зварювання
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Передплата доступна
у друкованому та цифровому форматах!
Підпишіться сьогодні.
Тел./факс: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua

УДК: 621.791.927 DOI: https://doi.org/10.37434/as2024.06.07

РОБОТОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ БАГАТОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДУГОЮ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ ТА КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

Є.В. Шаповалов, А.С. Новодранов, В.М. Ващенко, О.М. Савицький, Ф.С. Кліщар

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: artur19940731@gmail.com

У роботі розглянуті особливості застосування робототехнічного комплексу на базі антропоморфного робота Fanuc ARC Mate 100iC/7L для реалізації багатошарового наплавлення дугою періодичної дії. Показано, що хоча інверторне джерело зварювального струму Fronius TPS 320i за своїми технічними характеристикам не може забезпечити періодичне зменшення теплової потужності дуги до нульового рівня з частотою 0,2…0,5 Гц, однак технологічні можливості робота при відповідному програмуванні здатні забезпечити імпульсно-дуговий процес у вказаному діапазоні частот. Крім цього робот, оснащений системою машинного зору, дає змогу під час охолодження чергового наплавленого шару металу проводити контроль наявності поверхневих дефектів. Проведені дослідження макрошліфів, а також результати металографічних досліджень засвідчили високу якість формування наплавленого металу. У наплавленому металі формується практично монолітна дрібнозерниста структура (8…10 балів зерна) з високими показниками ударної в'язкості та пластичності при достатньо високій міцності. Наведене свідчить про доцільність застосування робототехнічних комплексів для багатошарового наплавлення та реалізації 3D технологій із застосуванням дугового зварювання в захисних газах. Бібліогр. 14, табл. 5, рис. 6.

Ключові слова: 3D технологія, дуга періодичної дії, структура металу, система машинного зору, робототехнічний комплекс

Вступ. Стійкою тенденцією розвитку сучасного виробництва матеріалів є забезпечення високої якості виробів у поєднанні з підвищенням продуктивності виробничих процесів. Один з напрямків вирішення цієї задачі – 3D технології, які за останні десятиліття набули широкого розповсюдження в різних галузях виробництва промислово розвинутих країн [1, 2]. Це обумовлено рядом їх переваг над традиційними виробничими процесами. 3D технології характеризуються високими можливостями автоматизації та програмування. Вони зводять до мінімуму непродуктивні витрати матеріалів та відходів виробництва, які необхідно переробити або утилізувати, що повинно позитивно вплинути на собівартість виробів.

У машинобудуванні за допомогою 3D технологій виготовляються вироби із різних матеріалів [3, 4], зокрема й метали. Габарити цих виробів, залежно від функціонального призначення, можуть варіюватися в широких межах: від міліметрів до кількох десятків метрів, а маса – від грамів до сотень кілограмів і навіть до кількох тонн.

Для реалізації 3D технологій при виготовленні металоконструкцій найоптимальнішим є дугове наплавлення плавким електродом у захисних газах. Це обумовлено рядом наступних переваг, таких як:

• можливість реалізації в усіх просторових положеннях з гарантованим захистом зони наплавлення та якісним формуванням наплавленого металу;

• практично повна відсутність розбризкування при використанні газових сумішей на основі інертного газу;

• мінімальна кількість шлаків, що важливо при багатошаровому наплавленні;

• широка номенклатура матеріалів для зварювання та наплавлення, а також зварювального обладнання;

• можливість автоматизації процесів зварювання та наплавлення.

Найпоширенішими матеріалами для створення металоконструкцій різного призначення є сталі, в основному вуглецеві. У процесі нагріву та охолодження при наплавленні вони змінюють свій агрегатний стан від твердого до рідкого і навпаки. У твердому стані в них відбуваються структурні перетворення: змінюються розміри зерен і фазовий склад металу [5–7]. У процесі всіх цих перетворень у сталях формується кінцева структура, яка визначає їх механічні властивості, експлуатаційну надійність і довговічність конструкцій. Тому при реалізації 3D технологій із застосуванням дугового наплавлення необхідно контролювати процеси

Шаповалов Є.В. – https://orcid.org/0000-0001-5063-9556, Новодранов А.С. – https://orcid.org/0000-0002-3380-3745, Ващенко В.М. – https://orcid.org/0009-0008-1476-3689, Савицький О.М. – https://orcid.org/0000-0002-2605-9647, Кліщар Ф.С. – https://orcid.org/0009-0008-6561-6064

© Є.В. Шаповалов, А.С. Новодранов, В.М. Ващенко, О.М. Савицький, Ф.С. Кліщар, 2024

формування структури наплавленого металу, тобто процеси плавлення і кристалізації металу, а також структурних перетворень на макро- і мікрорівнях. Це обумовлює актуальність роботи.

Дослідження проблем контролю структурних перетворень і формування структури сталей при зварюванні проводились під керівництвом Д.А. Дудко та Ф.А. Вагнера. Результати досліджень викладені в [8–13] і показують, що одним із методів вирішення проблеми є імпульсно-дуговий процес. При зварюванні неплавким електродом в аргоні для керування процесами структурних перетворень у твердому металі достатньо періодично зменшувати теплову потужність дуги [9, 10] до мінімального значення, при якому ще підтримується дуга, а зварювальна ванна кристалізується на 90 % свого об'єму.

При зварюванні плавким електродом за рахунок лише періодичного зменшення теплової потужності дуги до мінімуму не можливо досягти аналогічного впливу на об'єм кристалізації зварювальної ванни. Для підтримання стабільного дугового процесу і переносу електродного металу при діаметрі дроту 1,2 мм необхідний струм 120…130 А. Це у 24…26 разів більше, ніж при зварюванні неплавким електродом, при якому стабільна дуга підтримується при струмі 5 А. Крім цього, при зварюванні неплавким електродом пауза може тривати безкінечно довго, а під час паузи переміщення пальника може бути припинено. При зварюванні плавким електродом дугою змінної потужності тривалість паузи навіть при мінімально можливому зварювальному струмові обмежена величиною 1,0…1,5 с. Це обумовлено плавленням і переносом електродного металу, який накопичується в рідкій ванні. Це різко погіршує умови та якість формування наплавленого металу. Тому ванна за час паузи встигає кристалізуватися приблизно на 10…15 %. Внаслідок цього зварювання плавким електродом з періодичним зменшенням теплової потужності дуги не може суттєво вплинути на кінетику структурних перетворень у зварних з'єднаннях, а, відповідно, і на формування їх структури та властивостей. У зв'язку з цим зварювання плавким електродом вимагає повної періодичної кристалізації зварювальної ванни [13], що можливо лише при зварюванні дугою періодичної дії.

Робототехнічний комплекс здатен з високою точністю підтримувати задані параметри режиму наплавлення (зварювання): швидкість наплавлення (зварювання), швидкість подачі дроту та напругу дуги, а, відповідно, і зварювальний струм. Крім цього, роботехнічний комплекс зводить до мінімуму вплив людського фактора. Це повинно забезпечувати якість і стабільність формування наплавленого металу від шару до шару, а також позитивно впливати на структуру металу. Інтеграція системи машинного зору в робототехнічний комплекс дає змогу звести до нуля ймовірність пропуску поверхневих дефектів, таких як пори у наплавлених шарах.

Враховуючи наведене, **метою** роботи було виявлення технологічних можливостей промислового робота при реалізації багатошарового наплавлення імпульсно-дуговим способом з періодичним контролем поверхневих дефектів. При цьому необхідно було вирішити ряд завдань:

- виявлення можливості реалізації наплавлення дугою періодичної дії без застосування спеціалізованого обладнання;
- дослідження якості формування наплавленого металу;
- дослідження особливостей формування його макро- і мікроструктури;
- дослідження механічних властивостей наплавленого металу, а також оцінка відповідності твердості та зносостійкості шару заявленим паспортним даним.

Обладнання, матеріали та методика проведення експериментів. До складу робототехнічного комплексу входив антропоморфний робот Fanuc ARC Mate 100iC/7L (рис. 1, *а*) та інверторне джерело зварювального струму Fronius TPS 320i (рис. 1, *б*). Зв'язок джерела струму з роботом здійснюється через спеціальний контролер. Робот оснащено механізмом подачі зварювального дроту. У шосту ланку робота встановлено пальник, на якому закріплена система машинного зору, створена на базі нейромережевих алгоритмів і призначена для виявлення та класифікації поверхневих дефектів, які виникають під час адитивного наплавлення, а саме – пор.

Процес наплавлення виконувався дротами фірми Esab (Швеція), технічні характеристики та хімічний склад яких наведено в табл. 1. Дріт Esab OK Aristo Rod 12.50 – низьковуглецевий низьколегований, за своїм хімічним складом близький до дроту Св 08Г2С і до сталі 09Г2С. Дріт Esab OK Autrodur 56 GM – середньовуглецевий, легований хромом і призначений для зносостійкого наплавлення. Заявлена паспортна твердість наплавленого шару 50…60 HRC.

Наплавлення виконувалось таким чином, щоб габаритні розміри наплавлених шарів точно відповідали спроєктованій 3D моделі (рис. 2) для мінімізації відходів під час механічної обробки. Засто-

Таблиця 1. Характеристики дротів для виконання наплавлювальних робіт

Марка дроту	Тип дроту	Діаметр дроту, мм	Хімічний склад, %			
			C	Si	Mn	Cr
Esab OK Aristo Rod 12.50	суцільного перерізу	1,2	0,1	0,72	1,11	-
Esab OK Autrodur 56 GM	суцільного перерізу	1,6	0,40…0,50	2,70…3,30	≤0,80	8,0…10,0

Рис. 1. Роботизований комплекс для багатошарового наплавлення: *а* – робот Fanuc ARC Mate 100iC/7L; *б* – джерело струму Fronius TPS 320i Pulse з контролером

совувався імпульсний режим (дугою періодичної дії) з повною періодичною кристалізацією зварювальної ванни без коливань електрода за спеціальним алгоритмом.

В імпульсі – зупинка пальника та наплавлення, в паузі – переривання дуги та переміщення пальника. В якості захисного газу застосовувалась газова суміш 85 %Ar + 15 %CO_2. Кожний наступний прохід починався з точки початку попереднього, при цьому пальник підіймався на висоту, визначену за допомогою датчика дотику та програмної опції Touch Sense. Між наплавленням шарів відбувалось охолодження до температури нижче 80 ºС.

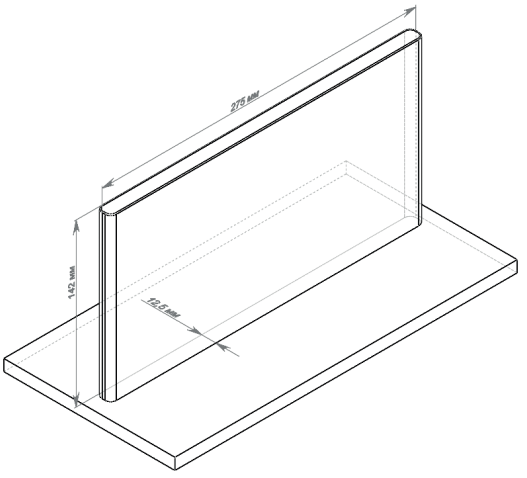


Рис. 2. 3D модель зразку для наплавлення

Довжина наплавленого шару 275 мм (45 імпульсів). Здійснено 75 проходів загальною висотою 142 мм (рис. 3, *а*). Ширина наплавленого металу склала 12,5 мм. Параметри режиму наплавлення наведено в табл. 2. Якісне формування наплавленого металу забезпечувалась шляхом точного позиціонування пальника робота, тобто точного відтворення заданої траєкторії наплавлення, в межах ± 0,03 мм.

Після досягнення висоти наплавлених шарів 130 мм виконувалось наплавлення зносостійким дротом суцільного перерізу Esab OK Autrodur 56 GM діаметром 1,6 мм (табл. 1). Наплавлення виконувалась аналогічно алгоритму, наведеному вище. Виконано 6 проходів заввишки 12 мм (рис. 3, *б*).

З наплавленого металу вирізалися заготовки для виготовлення зразків для:

- механічних випробувань на ударну в'язкість і розтяг;
- вивчення макроструктури та мікроструктури;
- дослідження твердості зносостійкого шару.

Випробування на ударну в'язкість проводились на зразках з круглим надрізом (Ми 47), із гострим надрізом (Ми 50 тип 11). Заготовки для виготовлення зразків вирізалися за наступною схемою. Два зразки кожного типу вирізалися вздовж шарів наплавлення, а один – впоперек. Надрізи на зраз-

Таблиця 2. Параметри режиму наплавлення

Тип наплавлення	I, А	Швидкість подачі дроту, м/с	U, В	$\tau_і$, с	$\tau_п$, с	Швидкість переміщення пальника, мм/с	Крок переміщення пальника, мм
Основні шари металу	60	6	27…28	1	2	4	6
Зносостійке наплавлення	90…200	3,5	29…30	1	2	4	6

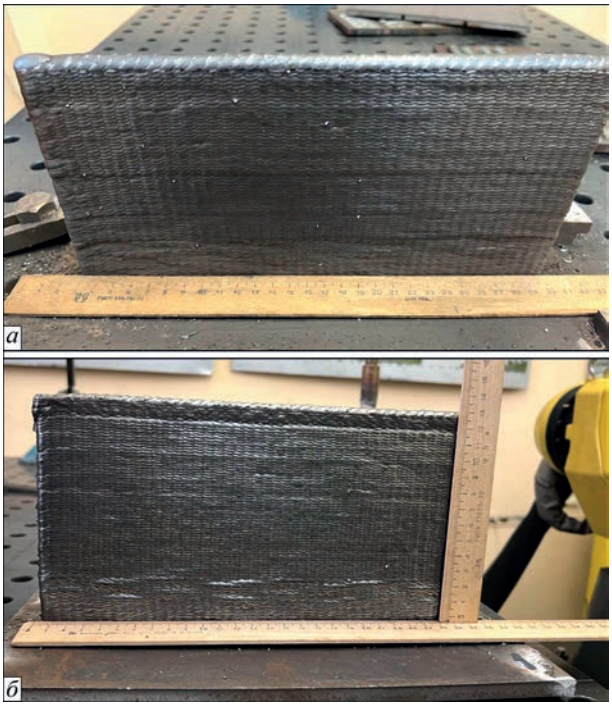


Рис. 3. Загальний вигляд наплавленого зразка: *а* – низьковуглецевим низьколегованим дротом Esab OK Arisnto Rod 12.50 (висота 130 мм); *б* – зносостійким дротом Esab OK Autrodur 58 GM (висота 12 мм)

ках, вирізаних вздовж наплавлених шарів, розмічались таким чином, щоб забезпечити удар у верхній і боковій площинах наплавлення. Випробування проводились при температурі + 20 ºС.

Випробування на розтяг проводилися на зразках Ми 12 тип 1. Заготовки для зразків вирізалися вздовж і впоперек шарів наплавлення.

Металографічні дослідження проводились за стандартною методикою оптичної металографії. Визначались розміри зерна в наплавленому металі та його фазовий склад.

Твердість зносостійкого шару вимірювали за методом Роквелла на приладі ТК 2м 441 за шкалою С з навантаженням 150 кгс за допомогою алмазного індентора.

Отримані результаті та їх аналіз. Для реалізації наплавлення або зварювання дугою періодичної дії необхідне спеціалізоване джерело зварювального струму, яке забезпечує можливість періодичного зменшення теплової потужності дуги до нульового рівня з частотою 0,2…0,5 Гц. Також потрібен спеціалізований механізм подачі дроту, який забезпечує періодичне зменшення швидкості подачі до нуля з частотою 0,2…0,5 Гц. При цьому старт і зупинка механізму подачі дроту повинні бути практично миттєвими, що можуть забезпечити серводвигуни, які застосовуються в сучасному зварювальному обладнанні. Але технічними характеристиками джерела струму Fronius TPS 320i Pulse такий режим функціонування не передбачений. Однак, як

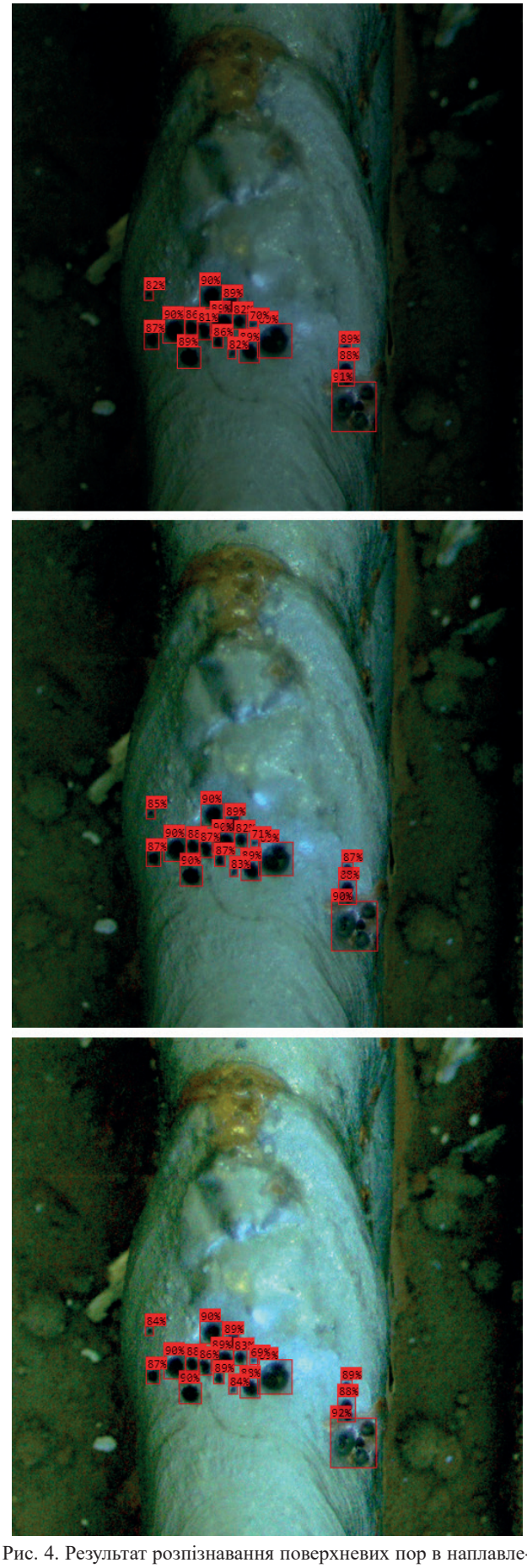


Рис. 4. Результат розпізнавання поверхневих пор в наплавленому шарі за різної інтенсивності освітлення

показали результати досліджень, функціонування комплексу обладнання в режимі дуги періодичної дії здатні забезпечити програмні можливості робота Fanuc ARC Mate 100iC/7L.

Розрахунок і програмування траєкторій наплавлення здійснювалось у спеціалізованому програмному забезпеченні Fanuc Roboguide. Застосовано апаратно-програмну опцію Touch Sense для визначення поточної просторової орієнтації і висоти наплавленого за один прохід шару. Отримані дані використовуються для подальшої корекції зварювальної траєкторії за допомогою контактного датчика. Перевага застосування опції Touch Sense полягає у дотриманні однакового вильоту електрода на кожному шарі.

Система машинного зору складається з апаратної і програмної підсистем. До апаратної підсистеми відноситься промислова кольорова швидкісна GigE камера та контролер обробки кадрів. Камера жорстко закріплена на пальнику робота, що забезпечує калібровку її системи координат відносно системи координат робота. Система машинного зору використовує модель згорткової нейронної мережі YOLO-NAS. Для навчання мережі отримано набір з 485 двовимірних кольорових зображень, які містили дефектні ділянки наплавлених шарів. Навчання моделі тривало 300 епох. За результатами навчання отримано задовільні кількісні показники якості виявлення та класифікації дефектів. Результати розпізнавання поверхневих пор на поверхні наплавленого шару із різним показником інтенсивності освітлення представлено на рис. 4. Під час сканування дефектних зон наплавленого шару визначено, що зміна інтенсивності освітлення несуттєво впливає на параметр достовірності виявлення поверхневих дефектів. Це пов'язано з оптимально підібраною моделлю нейронної мережі, а також високою ефективністю її навчання.

Система виконує сканування поверхні шару після наплавлення під час його охолодження, що не вимагає додаткових витрат робочого часу. У випадку виявлення поверхневих дефектів під час сканування наплавленого шару система інформує оператора шляхом виводу інформації про дефектні ділянки та їх розташування на монітор у вигляді стоп-кадру. Таким чином, інтеграція системи машинного зору в робототехнічний комплекс з метою виявлення поверхневих дефектів є доцільною. У процесі виконання багатошарового наплавлення система машинного зору виявляла дефектні ділянки, що забезпечило відсутність поверхневих дефектів типу пора у наплавленому металу. Це було підтверджено при дослідженні макрошліфів (рис. 5).

Отриманий зразок по всій висоті наплавлення формується без дефектів. Пори, напливи, тріщини, несплавлення та зашлакування відсутні, що доводить ефективність роботи системи машинного зору. Крім цього, видно, що метал має щільну, дрібнозернисту та однорідну структуру. Шари кристалізації фактично не проявляються, що свідчить про практично монолітну структуру. При наплавленні кожного наступного шару відбувалася термічна обробка попередньо наплавлених шарів. У верхній частині зразка чітко виділяється зносостійкий шар. У ньому досить чітко виділяються шари кристалізації. У нижній частині зразка – чітко виявлена зона термічного впливу. Форма проплавлення характерна для зварювання в суміші газів Ar + CO_2. Глибина проплавлення складає 1,5…2,0 мм, що обумовлено порівняно невеликим зварювальним струмом (табл. 2).

Результати металографічних досліджень наведено на рис. 6. Вони показують, що структура наплавленого металу являє собою суміш фериту з перлітом у співвідношенні приблизно 85 і 15 % відповідно (рис. 6, *а–в*). Розміри зерен коливаються в межах 8…10 балів за шкалою ДСТУ. Мікроструктура наплавленого зносостійкого шару являє собою дрібногольчастий мартенсит (рис. 6, *г*).

Результати випробувань на ударну в'язкість наведено в табл. 3. Надрізи на зразках, вирізаних вздовж наплавлених шарів, розмічалися таким чином, щоб забезпечити удар у верхній і боковій площинах наплавлення.

З табл. 3 видно, що наплавлений метал характеризується високими показниками ударної в'язкості

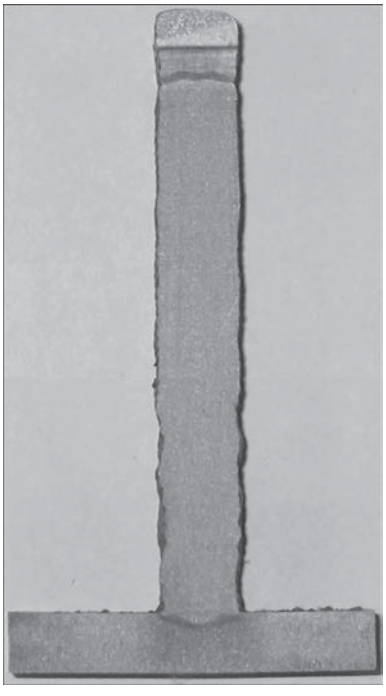


Рис. 5. Поперечний макрошліф наплавленого металу

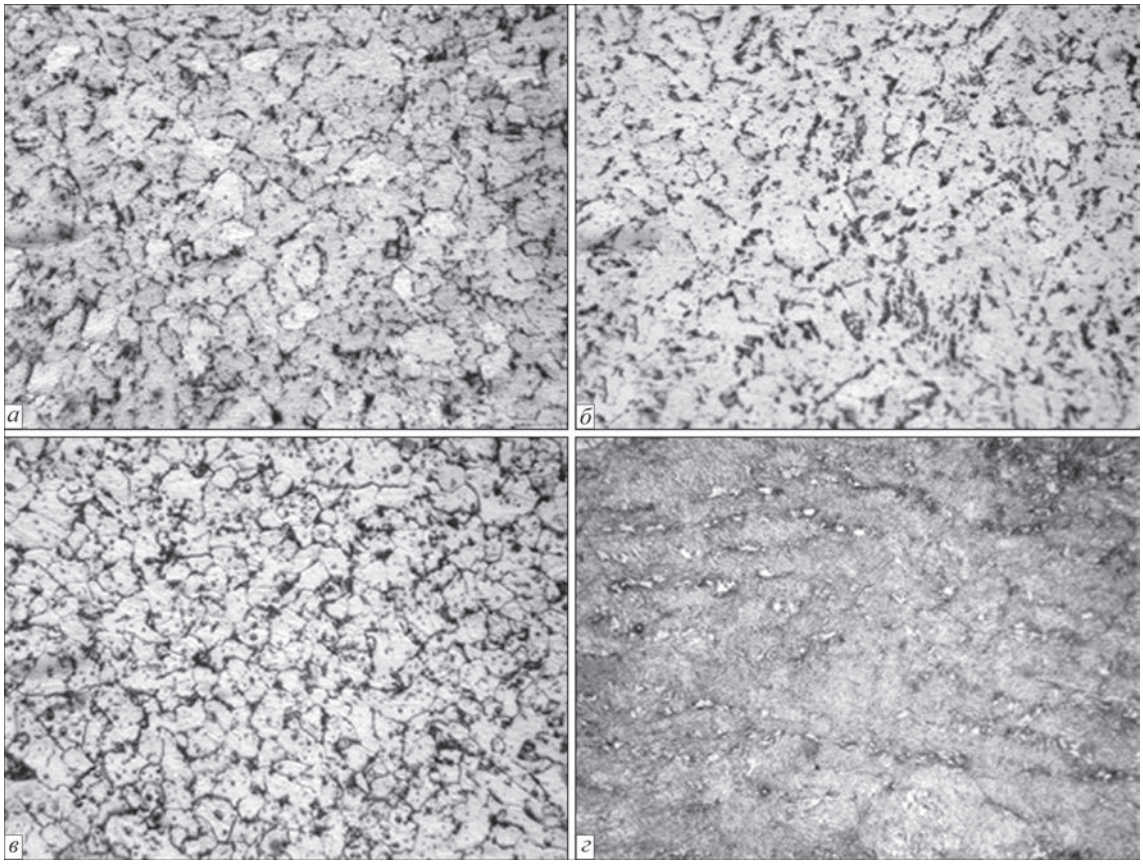


Рис. 6. Мікроструктура наплавленого металу (×500): *а* – нижня частина наплавленого металу; *б* – середня частина наплавленого металу; *в* – верхня частина наплавленого металу; *г* – зносостійке наплавлення

за *KCU* і *KCV*. В обох випадках прослідковується наступна закономірність. Найнижчу ударну в'язкість мають зразки, вирізані вздовж шарів наплавлення при ударі зверху. Зразки, вирізані вздовж шарів наплавлення, при ударі збоку мають проміжні показники ударної в'язкості, які перевищують попередні. Найвищі показники ударної в'язкості мають зразки, вирізані впоперек шарів наплавлення.

Випробування на розтяг проводились на зразках Ми 12 тип 1. Заготовки для зразків вирізались вздовж і впоперек шарів наплавлення. Результати випробувань наведено в табл. 4. Вони свідчать, що, незалежно від напрямку вирізання заготовок, для зразків показники міцності та пластичності дуже близькі за значенням. Порівняння цих показників з показниками міцності та пластичності сталі 09Г2С показують, що наплавлений метал перевищує сталь 09Г2С [14]. Це при тому, що сталь 09Г2С пройшла термомеханічну обробку, а наплавлений метал має литу структуру та не піддавався проковуванню чи прокатці.

Таким чином, результати механічних випробувань на ударну в'язкість і розтяг показали, що наплавлений метал за показниками міцності, пластичності та ударної в'язкості перевищує аналогічні показники сталі 09Г2С, яка за хімічним складом найближча до наплавленого металу.

Таблиця 3. Результати випробувань наплавленого металу на ударну в'язкість

Температура випробувань	№ зразка	Напрямок удару	*KCU*, Дж/см^2	*KCV*, Дж/см^2
+20 ºС	1	Вздовж наплавлення, удар зверху	283,2	–
	2	Вздовж наплавлення, удар збоку	306,0	–
	3	Впоперек наплавлення	343,0	–
	4	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	212,9
	5	Вздовж наплавлення, удар збоку	–	230,3
	6	Впоперек наплавлення	–	245,1

Таблиця 4. Результати випробувань на розтяг

Температура випробувань	Номер зразка	Вирізка зразка	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %
+20 ºС	1	Вздовж наплавлення	369,9	493,2	39,9	75,7
	2	Впоперек наплавлення	378,8	494,6	27,2	75,0
	Сталь 09Г2С (довідкові дані) [14]		325,0	470,0	21,0	63,0

Таблиця 5. Твердість металу зносостійкого шару

Номер заміру твердості зносостійкого шару	Фактична твердість, HRC	Заявлена твердість, HRC
1	42	50...60
2	46	
3	52	
4	57	
5	44	

У табл. 5 наведено результаті дослідження твердості наплавленого зносостійкого шару. Ці дані свідчать, що твердість зносостійкого шару в трьох замірах із п'яти виконаних не досягає заявлених паспортних показників і лише у двох замірах відповідає заявленому паспортному інтервалу твердості. Крім цього, різниця між максимальним і мінімальним показниками твердості досягає 15 HRC.

Нерівномірність у розподілі твердості можна пояснити процесом термоциклування, яке відбувається при наплавленні дугою періодичної дії [9, 10]. Термоциклування призводить до зменшення твердості та може вливати на рівномірність її розподілу. Однак практичних даних поки що мало, щоб робити впевнені висновки. Дослідження в даному напрямку продовжуються. Результати будуть опубліковані в наступних роботах.

Висновки

1. Встановлено, що антропоморфний робот Fanuc ARC Mate 100iC/7L забезпечує наплавлення дугою періодичної дії навіть без спеціалізованих джерел зварювального струму та механізму подачі дроту. Геометричні розміри отриманого зразка, створеного за допомогою наплавлення, відповідають спроєктованій 3D моделі з допустимою похибкою ± 0,5 мм. Крім того, робот, оснащений системою машинного зору, забезпечує гарантоване виявлення поверхневих дефектів типу пор.

2. При багатошаровому наплавленні із застосуванням робототехнічного комплексу в металі формується дрібнозерниста (8…10 балів) структура, близька до монолітної, шари наплавлення майже не проглядаються.

3. Наплавлений метал має високі показники ударної в'язкості ($KCU \leq 343$ Дж/см^2, $KCV \leq 245$ Дж/см^2) та пластичності ($\delta \leq 39{,}9$ %, $\psi \leq 75{,}7$ %) при достатньо високій міцності ($\sigma_в \leq 494{,}6$ МПа).

4. Заміри твердості на поверхні зносостійкого шару показали, що результати трьох з п'яти замірів не відповідають інтервалу твердості, зазначеному в паспортних даних виробника ESAB.

Список літератури

1. ASTM-International, ASTM Standard F2792-12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.*
2. Anuj V. Dongaonkar, Rajesh M. Metkar (2019) Reconstruction of damaged parts by integration reverse engineering (RE) and rapid prototyping (RP). *In: 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0_14
3. Shah, A., Aliyev, R., Zeidler, H., Krinke, S. (2023) A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process. *J. Manuf. Mater. Process*, **7**, 97. DOI: https://doi.org/10.3390/jmmp7030097
4. Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M. et al. (2019) Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, **12**, 1121. DOI: https://doi.org/10.3390/ma12071121
5. Гуляев А.П. (1966) *Металловедение*. Москва, Металлургия.
6. Патон Б.Е. (1974) *Технология электрической сварки плавлением*. Москва, Машиностроение.
7. Шоршоров М. Х. (1965) *Металловедение сварки стали и сплавов титана*. Москва, Наука.
8. Дудко Д.А., Савицкий А.М., Васильев В.Г., Новикова Д.П. (1996) Особенности структуры и свойств в сварных соединениях, формируемых с термоциклированием. *Автоматическая сварка,* **2**, 6–7.
9. Дудко Д.А., Савицкий А.М., Савицкий М.М. и др. (1999) Восстановление остряков железнодорожных стрелочных переводов наплавкой со сложным термоциклом. *Автоматическая сварка*, **12**, 46–49.
10. Дудко Д.А., Савицкий А.М., Савицкий М.М., Олейник Е.М. (1998) Особенности тепловых процессов при сварке с термоциклированием. *Автоматическая сварка*, **4**, 8–12.
11. Вагнер Ф.А. (1980) *Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой*. Москва, Энергия.
12. Вагнер Ф.А., Степанов В.В. (1968) Выбор параметров режима сварки пульсирующей дугой и их влияние на свойства сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **5**, 14–16.
13. Вагнер Ф.А. (1980) Термоциклирование при сварке вольфрамовым электродом. *Сварочное производство*, **2**, 4–6.
14. Сорокин В.Г. (1989) *Марочник сталей и сплавов*. Москва, Машиностроение.

References

1. ASTM-International, ASTM Standard F2792-12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.*
2. Anuj V. Dongaonkar, Rajesh M. Metkar (2019) Reconstruction of damaged parts by integration reverse engineering (RE) and rapid prototyping (RP). *In: 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0_14
3. Shah A, Aliyev R, Zeidler H, Krinke S. (2023) A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process. *J. Manuf. Mater. Process*, **7**, 97. DOI: https://doi.org/10.3390/jmmp7030097
4. Rodrigues, T.A.; Duarte, V.; Miranda, R.M.; Santos, T.G.; Oliveira, J.P. (2019) Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, **12**, 1121. DOI: https://doi.org/10.3390/ma12071121
5. Gulyaev, A.P. (1966) *Metal research*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Paton, B.E. (1974) *Electric fusion welding technology*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Shorshorov, M.Kh. (1965) *Metal science of welding steel and titanium alloys*. Moscow, Nauka [in Russian].

8. Dudko, D.A., Savitsky, A.M., Vasiliev, V.G., Novikova, D.P. (1996) Features of structure and properties in welded joints formed with thermal cycling. *Avtomatich. Svarka,* **2**, 6–7 [in Russian].
9. Dudko, D.A., Savitsky, A.M., Savitsky, M.M., Polikarpov, V.F., Savitsky, V.L. (1999) Restoration of railway switch points by surfacing with a complex thermal cycle. *Avtomatich. Svarka*, **12**, 46–49 [in Russian].
10. Dudko, D.A., Savitsky, A.M., Savitsky, M.M., Oleynik, E.M. (1998) Features of thermal processes during welding with thermal cycling. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 8–12 [in Russian].
11. Wagner, F.A. (1980) *Equipment and methods of pulsed arc welding*. Moscow, Energiya [in Russian].
12. Wagner, F.A., Stepanov, V.V. (1968) Selection of pulsed arc welding mode parameters and their influence on the properties of welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 14–16 [in Russian].
13. Wagner, F.A. (1980) Thermal cycling when welding with a tungsten electrode. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 4–6 [in Russian].
14. Sorokin, V.G. (1989) *Data base of steels and alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

ROBOTIC COMPLEX FOR MULTILAYER SURFACING BY PERIODIC ARC AND CONTROL OF SURFACE DEFECTS OF THE DEPOSITED METAL

E.V. Shapovalov, A.S. Novodranov, V.M. Vashchenko, O.M. Savytskyi, F.S. Klishchar

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: artur19940731@gmail.com

The paper considers the peculiarities of using a robotic complex based on the anthropomorphic robot Fanuc ARC Mate 100iC/7L for the implementation of multilayer surfacing with a periodic arc. It has been shown that although the inverter welding current source Fronius TPS 320i, according to its technical characteristics, cannot provide a periodic reduction in the arc thermal power to zero at a frequency of 0.2...0.5 Hz, the technological capabilities of the robot, with appropriate programming, are capable of providing a pulsed arc process in the specified frequency range. In addition, the robot, equipped with a machine vision system, allows testing for surface defects during the cooling of the next deposited metal layer. The macrosections and metallographic tests showed the high quality of the deposited metal formation. In the deposited metal, an almost monolithic fine-grained structure (8...10 grain numbers) with high impact strength and ductility at a sufficiently high strength is formed. The above indicates the expediency of using robotic systems for multilayer surfacing and the implementation of 3D technologies using arc welding in shielded gases. 14 Ref., 5 Tabl., 6 Fig.

Keywords: 3D technology, periodic arc, metal structure, machine vision system, robotic complex

Отримано 28.06.2024
Отримано у переглянутому вигляді 22.07.2024
Прийнято 13.09.2024

ДЕМОНСТРАЦІЯ В КНР ЗВАРЮВАННЯ ЖИВИХ ТКАНИН В ОТОЛАРИНГОЛОГІЇ

У липні 2024 р. завідувач кафедри дитячої оториноларингології, аудіології та фоніатрії НУОЗ України ім. П.Л. Шупика, професор Анатолій Косаківський та співробітник відділу «Зварювальні та споріднені технології в медицині та екології» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України Віктор Ткаченко відвідали лікарню № 2 міста Нінбо в КНР, де відбулися перемовини за участю провідних спеціалістів відділу отоларингології.

А. Косаківський та В. Ткаченко, поділилися досвідом використання технології зварювання живих біологічних тканин в отоларингології із демонстрацією відеоматеріалів, а також провели майстер-клас із використанням обладнання для електрозварювання на внутрішніх органах тварин *in vitro*. При цьому використовувались генератор ЕКВЗ-300, розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, та спеціалізовані інструменти, виготовлені за патентами А. Косаківського.

Були проведені хірургічні втручання *in vivo* на здорових дорослих собаках. А. Косаківський разом з В. Ткаченком виконали 9 операцій, зокрема тонзилектомії, електротермоадгезію піднебінних мигдаликів, фенолупластику, електротермоадгезію нижніх носових раковин, видалення пухлини орбіти з одночасним зварюванням країв рани. Ускладнень після хірургічних втручань не спостерігалось.

Китайські лікарі позитивно оцінили технологію електрозварювання живих біологічних тканин та якість проведених хірургічних втручань. Китайська сторона висловила готовність впроваджувати дану технологію в КНР та проведення спільних наукових досліджень.

Проведені експерименти демонструють, що технологія високочастотного зварювання тканин є безпечнішим і ефективнішим методом тонзилектомії порівняно з монополярною електрокоагуляцією. Техніка зварювання тканин призвела до зменшення інтраопераційної кровотечі, швидшого відновлення та скорочення тривалості операції. Отримані результати свідчать про те, що високочастотне зварювання тканин може мати широке застосування в клінічній хірургії, особливо для пацієнтів із ризиком кровотечі.

ВікторТкаченко

УДК 621.791.793:621.311.6:621.791.03 DOI: https://doi.org/10.37434/as2024.06.08

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВОК ЕШЗ/ЕШП З ФАЗОІМПУЛЬСНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ТИРИСТОРІВ

Ю.М. Ланкін, В.Ф. Семікін, Є.М. Байштрук, І.Ю. Романова

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

Розглянуто характеристики трансформаторних джерел живлення з фазаімпульсним регулюванням тиристорних контакторів, що забезпечують плавне регулювання напруги. Основний їх недолік – неприпустимо низький коефіцієнт потужності. Розглянуто характеристики та рекомендовані області застосування дво-, три- та чотириступінчастих джерел живлення із фазоступінчастим регулюванням, що мають високий коефіцієнт потужності в широкому діапазоні регулювання напруги. Системи фазоступінчастого регулювання дуже добре підходять для модернізації існуючих джерел живлення зі ступінчастим регулюванням, підвищуючи якість продукції, що випускається, і технологічні можливості при збереженні високих енергетичних характеристик. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електрошлакові технології, джерела живлення змінного струму, фазоімпульсне регулювання, фазоступінчасте регулювання, коефіцієнт потужності

Вступ. В електрошлакових технологіях джерелом тепла, яке витрачається на плавлення електродного дроту або металу, що переплавляється, є розплавлений електропровідний шлак, через який проходить струм, що викликає його нагрів. У діапазоні робочих температур ванна розплавленого шлаку для джерела живлення є практично чисто резистивним лінійним навантаженням. Електрошлаковий процес на змінному струмі відбувається стійкіше, ніж на постійному. Тому в більшості випадків для ЕШЗ/ЕШП застосовуються джерела живлення змінного струму промислової частоти як найпростіші, дешевші та надійніші.

Згідно з технологічними вимогами вихідна напруга трансформаторів для ЕШЗ/ЕШП складає 50...80 В. Якість зварних швів ЕШЗ і якість металу, отриманого в процесі ЕШП, суттєво залежить від стабільності теплового режиму шлакової ванни, який, у свою чергу, визначається електричним режимом зварювання та переплаву, умовами охолодження зварного шва або зливка, коливаннями напруги мережі та іншими збуреннями, що впливають на технологічний процес. Це призводить до необхідності регулювання вихідної напруги джерел живлення в межах 100…50 %.

Метою роботи є дослідження регулювальних та енергетичних характеристик систем регулювання напруги джерел живлення змінного струму для електрошлакових технологій.

Характеристики джерел живлення установок ЕШЗ/ЕШП з плавним регулюванням вихідної напруги фазоімпульсним регулюванням тиристорів. У джерелах живлення для ЕШЗ/ЕШП застосовуються три способи регулювання напруги під навантаженням: зміна кількості ввімкнених витків первинної обмотки трансформатора (ступінчасте регулювання); використання спеціальних трансформаторів з магнітною комутацією, що забезпечує плавну зміну напруги в достатньо широких межах; застосування дроселів насичення (магнітних підсилювачів) або керованих вентилів, що вмикаються зустрічно-паралельно в ланцюг первинної або вторинної обмотки трансформатора (плавне регулювання) [1, 2] (рис. 1).

Трансформатори зі ступінчастим регулюванням напруги (рис. 1, *а*) отримали в даний час найбільше розповсюдження. Перевагою ступінчастого методу регулювання напруги, що підводиться до навантаження, є відсутність зміни форми кривої напругі, а також відсутність фазового зсуву струму відносно напруги мережі живлення (при чисто активному навантаженні). Межі регулювання їхньої вихідної напруги зазвичай становлять 50…100 %. Зменшення дискретності регулювання живлячої напруги для плавного регулювання призводить до створення трансформаторів з більшим числом відпайок (до 100 і більше), що разом з ускладненням конструкції силових трансформаторів ускладнює також і роботу перемикача ступенів напруги, знижуючи в цілому довговічність і надійність джерела живлення.

Схема з вольтододатковим трансформатором (рис. 1, *б*) дозволяє здійснювати роздільне регу-

Ланкін Ю.М. – https://orcid.org/0000-0001-6306-8086, Семікін В.Ф. – https://orcid.org/0000-0002-7407-5887, Романова І.Ю. – https://orcid.org/0000-0001-7154-1830

© Ю.М. Ланкін, В.Ф. Семікін, Є.М. Байштрук, І.Ю. Романова, 2024

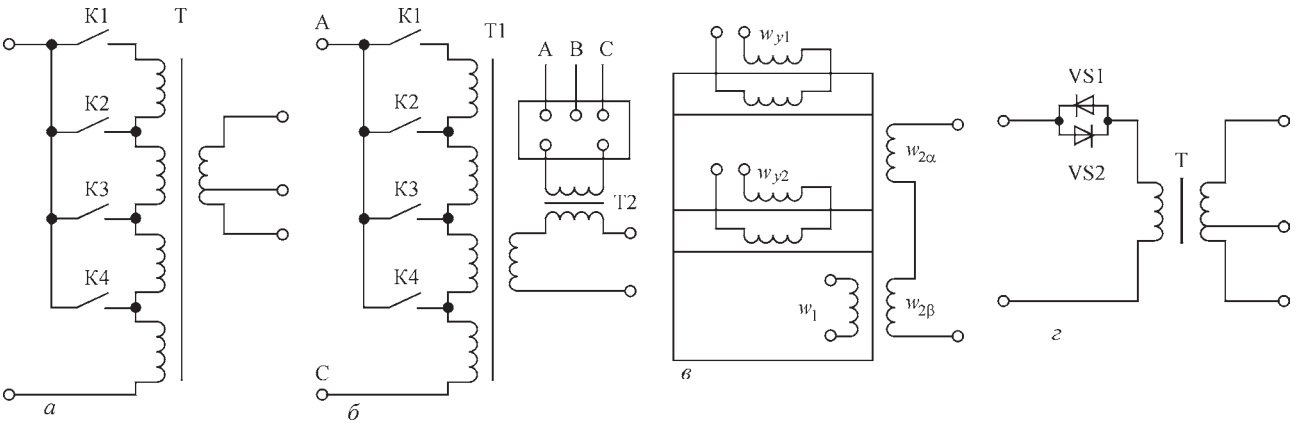


Рис. 1. Електричні схеми зварювальних трансформаторів із різними способами регулювання напруги

лювання фазових напруг у необхідних межах і не потребує потужної комутаційної апаратури.

У джерелах струму з магнітною комутацією (рис. 1, *в*) напругу регулюють шляхом підмагнічування постійним струмом (за допомогою керуючих обмоток w_{y1} і w_{y2}) двох ярем трансформатора та перерозподілу основного магнітного струму між ними.

Схема з керованими вентилями (рис. 1, *г*) має задовільні регулювальні характеристики: плавне регулювання вихідної напруги в діапазоні 0…100 %, що досягається шляхом зміни кута ввімкнення α та кута провідності λ керованих вентилей (рис. 2). Однією з перших тиристорне регулювання напруги на шлаковій ванні в своїй системі управління процесом ЕШП застосувала шведська фірма ASEA [3].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона на цьому принципі пізніше також було розроблено тиристорний регулятор напруги А-1307 [1].

Проте регулювання напруги за допомогою тиристорів (рис. 1, *г*), призводить до зниження коефіцієнта потужності χ пропорційно глибині регулювання. Оскільки електрошлакові технології є електровитратними, будь-які вдосконалення, що скорочують витрати електроенергії в них, є необхідними та актуальними [4]. Це викликано тим, що струм і напруга навантаження в цих джерелах живлення є суттєво несінусоїдальними (рис. 2).

Аналіз електричних ланцюгів з нелінійними елементами проводиться за допомогою надання реальної форми досліджуваного сигналу у вигляді гармонічного спектру струмів і напруг:

– амплітуда першої гармоніки I_{1M}:

$$I_{1m} = \frac{1}{\pi}\sqrt{(\pi-\alpha)^2 + (\pi-\alpha)\cdot\sin 2\alpha + \sin^2\alpha},$$

– амплітуда *n*-ї гармоніки:

$$I_{nm} = \frac{2}{\pi}\frac{\sqrt{(n\cdot\sin\alpha - \sin n\alpha)^2 + (\cos\alpha - \cos n\alpha)^2}}{n^2-1}.$$

Зі зміною величини кута регулювання α змінюється гармонічний спектр струму і, відповідно, енергетичні характеристики ланцюга з вентилями (рис. 3).

Крім активної потужності тиристорний регулятор споживає також реактивну потужність за рахунок зсуву фаз між першими гармоніками напруги та напруги генератора, що виникає при фазовому регулюванні тиристорами. При природній комутації вентилей струм відстає від напруги на кут φ_1, що визначається кутом ввімкнення тиристорів α (рис. 3). Косинус кута зсуву за фазою між перши-

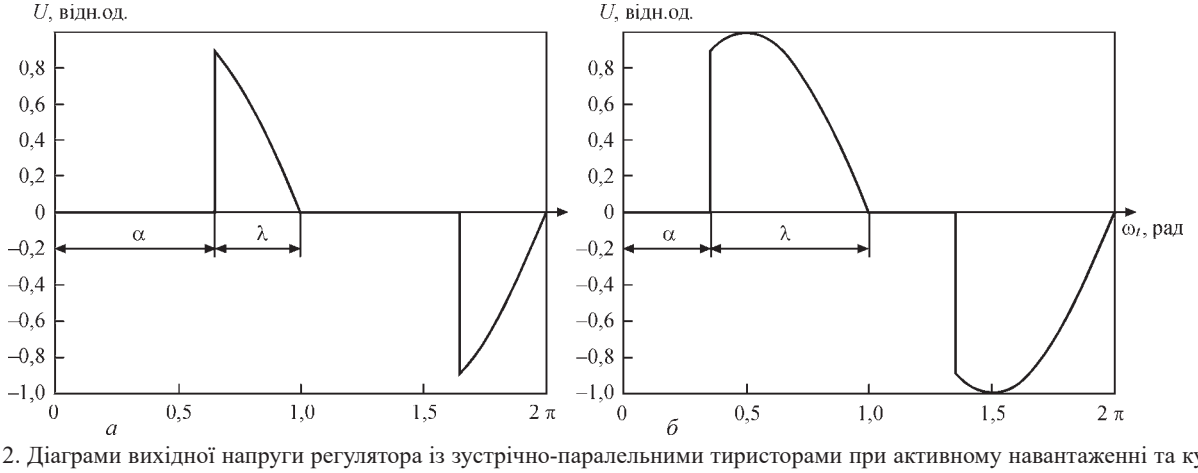


Рис. 2. Діаграми вихідної напруги регулятора із зустрічно-паралельними тиристорами при активному навантаженні та кутах ввімкнення тиристорів: *а* – α = 0,65π; *б* – α = 0,35π

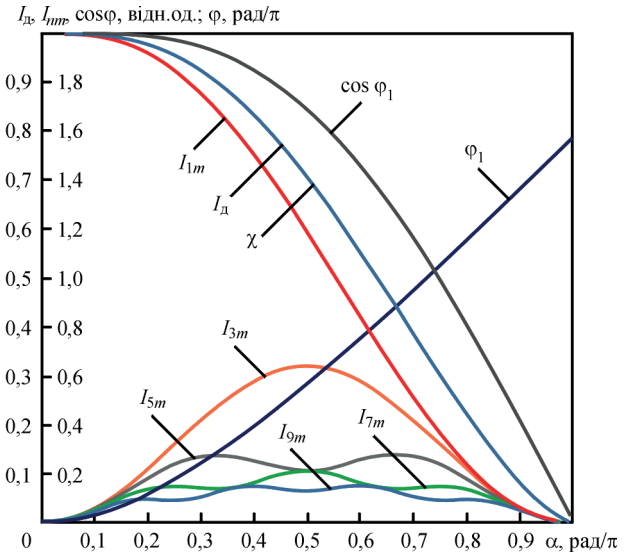


Рис. 3. Гармонічний спектр струму, фазового зсуву першої гармоніки φ_1, cos φ_1 і коефіцієнта потужності χ у залежності від кута ввімкнення тиристорів α

ми гармоніками струму та напруги $\cos\varphi_1$ визначається як:

$$\cos\varphi_1 = \frac{(\pi-\alpha)+\frac{\sin 2\alpha}{2}}{\sqrt{(\pi-\alpha)+(\pi-\alpha)\cdot\sin 2\alpha+\sin^2\alpha}}.$$

Показники якості енергії, що споживається, можуть бути оцінені коефіцієнтом потужності $\chi = P/S$, що визначає, яка частка від найбільшої потужності, яку можна отримати від джерела живлення при заданих діючих значеннях напруги та струму, використовується навантаженням, де P – активна потужність, S – повна потужність. У нашому випадку коефіцієнт потужності χ дорівнює відносному діючому значенню струму $I_д$:

$$\chi = I_Д = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\pi-\alpha+\frac{\sin 2\alpha}{2}}.$$

Зі збільшенням кута ввімкнення тиристорів для плавного зменшення напруги (струму) коефіцієнт потужності змінюється від 1 до 0 (рис. 3), що є основним недоліком тиристорних регуляторів з фазоімпульсним регулюванням. Передача реактивної потужності по лініях призводить до виникнення додаткових активних втрат во всіх елементах системи. Наявність вищих гармонічних складових струму, що споживається, призводить до низки небажаних явищ у мережі живлення: додаткових втрат у магнітопроводах і обмотках трансформаторів і генераторів, а також у розподільчій мережі, до різних резонансних явищ.

Транспортування реактивної потужності повітряними та кабельними лініями електропередачі за допомогою силових трансформаторів заподіює енергетикам великих збитків. Це – поява додаткових втрат активної потужності ΔP; виникнення додаткових втрат напруги ΔU; зменшення пропускної спроможності систем електропостачання завантаженням реактивною потужністю.

У 1995 р. введено в дію міжнародний стандарт МЭК IEC 1000-3-2 (ДСТУ EN IEC 61000-3-2:2019), згідно з яким коефіцієнт потужності працюючих пристроїв з потужністю більше 300 Вт для всіх споживачів повинен наближатися до одиниці. Типові оцінки якості електроспоживання наведено в таблиці. Практично коефіцієнт потужності 0,95 і вище вважається відмінним показником.

Як зазначено вище, звичайний діапазон регулювання вихідної напруги джерел живлення для електрошлакових технологій складає 50 %. З рис. 3 випливає, що в джерелах живлення з фазоімпульсним регулюванням вихідної напруги його зниження до 50 % отримаємо при куті регулювання тиристорів $\alpha = 0{,}63\pi$. Згідно з рис. 3 при такому значенні кута регулювання коефіцієнт потужності $\chi = 0{,}5$, тобто його значення є незадовільним за загальноприйнятою думкою (див. таблицю).

Характеристики джерел живлення установок ЕШЗ/ЕШП з плавним регулюванням вихідної напруги фазоступінчастим регулюванням тиристорів. Підвищити коефіцієнт потужності джерела живлення з трансформатором і тиристорним регулюванням напруги можна шляхом фазоступінчастого регулювання [5]. Існує дво-, три-, чотири- і багатоступінчасте фазове регулювання (рис. 4). Суть фазоступінчастого методу – у використанні фазового регулювання для плавної зміни діючого значення напруги на навантаженні в межах кожного ступеня вихідної напруги. Виконуючи широкий діапазон плавного регулювання напруги, фазоступінчастий метод забезпечує вищі значення коефіцієнта потужності у порівнянні з фазоімпульсним методом регулювання.

Джерело живлення змінного струму з двоступінчастою схемою фазоступінчастого регулювання напруги зображено на рис. 4, *а*. Регулюючий елемент складається з двох зустрічно-паралельних тиристорних груп і трансформатора Т. Схема працює наступним чином. На початку позитивного напівперіода вхідної напруги U_c (кут $\alpha = 0$) схема управління вмикає тиристор VS1 першої ко-

Типові оцінки якості електроспоживання

Значення коефіцієнта потужності	Високе	Добре	Задовільне	Низьке	Незадовільне
	0,95…1	0,8…0,95	0,65…0,8	0,5…0,65	0…0,5

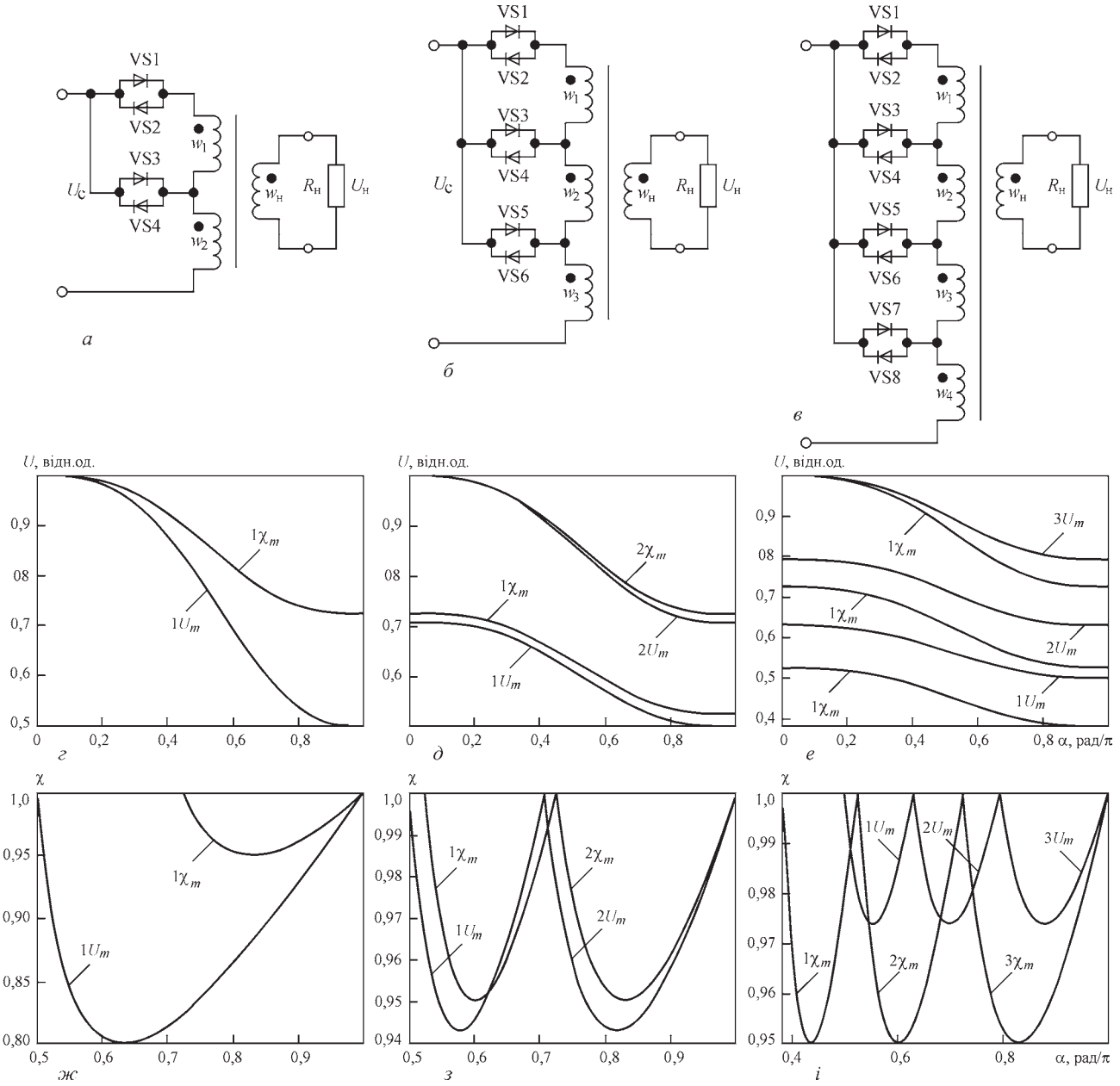


Рис. 4. Фазоступінчасті регулятори напруги: *а* – двоступінчастий; *б* – триступінчастий; *в* – чотириступінчастий та їх регулювальні характеристики (*г*, *д*, *е*) і коефіцієнти потужності (*ж*, *з*, *і*) відповідно, $1\chi_m$ – $3\chi_m$ – залежності U і χ від α на 1–3 ступенях регулювання для регуляторів з $\chi_{min} = 0{,}95$, $1U_m$ – $3U_m$ – так само для регуляторів з $U_{min} = 0{,}5$

мутуючої групи. При цьому амплітуда напруги на навантаженні буде $U_{mн} = U_{mc} \cdot n$, де $n = w_н/(w_1+w_2)$ – коефіцієнт трансформації, U_{mc} – амплітуда напруги мережі (рис. 5, *а*). При заданому куті $\alpha > 0$ схема управління вмикає тиристор VS3 II комутуючої групи, коефіцієнт трансформації у вторинний ланцюг стрибкообразно зростає в m разів, де $m = (w_1+w_2)/w_2$ – коефіцієнт перемикання схеми джерела живлення. Транзистор VS1 замикається зворотною напругою, яка виникає в обмотці w_1 трансформатора Т (рис. 5, *б*). На початку наступного (негативного) напівперіода вмикається тиристор VS2 (рис. 4, *а*), потім при фазі вхідної напруги, що дорівнює α, відмикається тиристор VS4, а тиристор VS2 замикається і миттєве значення вихідної напруги знову стрибкообразно зростає в m разів (рис. 5, *б*). У результаті на виході джерела живлення напруга має ступінчасто-синусоїдальну форму (рис. 5, *б*, *в*), діюча напруга на навантаженні U зростає. Якщо кут запалення тиристорів VS3, VS4 зменшується, наприклад стає $\alpha = 0{,}65\pi$, то напруга на навантаженні ще збільшується (рис. 5, *в*) у порівнянні з рис. 5, *б*. При куті ввімкнення тиристорів VS3, VS4 $\alpha = 0$ напруга на навантаженні стає максимальною (рис. 5, *г*). У результаті в системі (рис. 4, *а*) з фазоступінчастим регулюванням відбувається плавне регулювання напруги, але з меншим викривленням форми, ніж при фазоімпульсному регулюванні. Таким чином, при плавному регулюванні кутом α (моментом відпирання

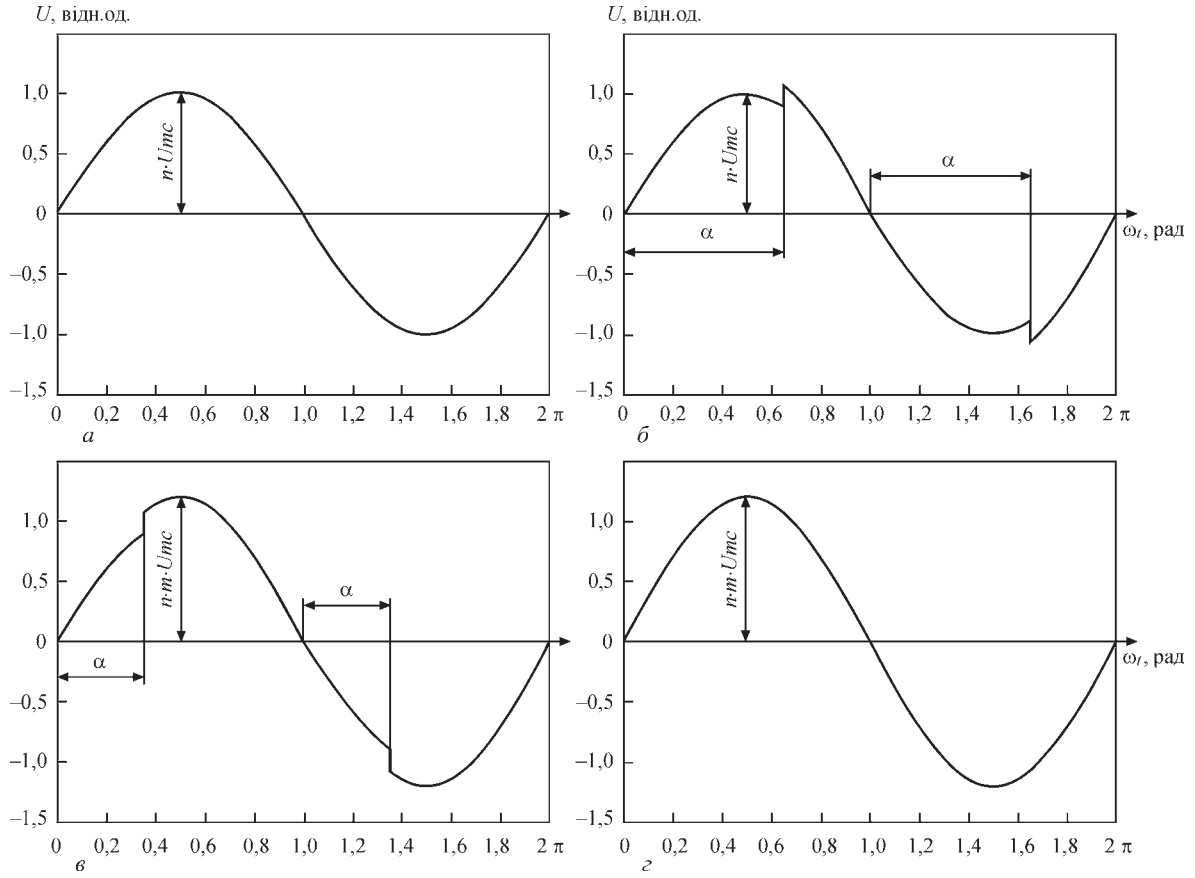


Рис. 5. Діаграми вихідної напруги джерела живлення з двотактним (фазоступінчастим) тиристорним регулятором при активному навантаженні: *а* – α = π; *б* – α = 0,65π; *в* – α = 0,35π; *г* – α = 0

тиристорів VS3, VS4) перетворювач змінює діюче значення напруги на навантаженні в межах від nU_c (рис. 5, *а*) до nmU_c (рис. 5, *г*). Регулююча характеристика діючого значення напруги на навантаженні $U_{нг}$ = f(α) будується на залежності:

$$U_{НГ} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\alpha}(\sqrt{2}U_1)^2 \sin^2 \omega t\, d\omega t + \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}(\sqrt{2}U_2)^2 \sin^2 \omega t\, d\omega t},$$

де $U_1 = n \cdot m \cdot U_c$ і $U_2 = n \cdot U_c$.

Після спрощення формули отримаємо:

$$U_{НГ} = \sqrt{\frac{U_1^2}{\pi}\left(\alpha - \frac{1}{2}\sin 2\alpha\right) + \frac{U_2^2}{\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{1}{2}\sin 2\alpha\right)}.$$

Відносне значення регульованої напруги на навантаженні $U = (U_{НГ}/U_c)n \cdot m$ дорівнює:

$$\overset{*}{U} = \sqrt{1 + \frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha\left(1 - a^2\right) + \frac{\alpha}{\pi}\left(a^2 - 1\right)},$$

де $a = 1/m$.

Залежність коефіцієнта потужності χ від α (рис. 4, *ж*) при активному навантаженні визначається за залежністю:

$$\chi = \frac{m^2 - \frac{m^2 - 1}{\pi}\left(\alpha - \frac{1}{2}\sin 2\alpha\right)}{\sqrt{m^4 - \frac{m^4 - 1}{\pi}\left(\alpha - \frac{1}{2}\sin 2\alpha\right)}}$$

Як видно з рис. 4, *ж*, χ має мінімум при деякому значенні α. З формули для χ знаходимо цей мінімум у залежності від *m*:

$$\chi_{min} = 2m/(m^2+1).$$

При m = 1,38 маємо χ_{min} = 0,95 і $\chi_{ср}$ = 0,9796 (рис. 4, *ж*, крива $1\chi_m$), а $U_{min} = 1/m$ = 0,725 (рис. 4, *г*, крива $1\chi_m$). Оптимальною областю застосування схеми (рис. 4, *а*) є стабілізатор одної нерегулюємої напруги U при коливаннях напруги мережі живлення. Якщо напруга, що стабілізується, за величиною близька до величини номінальної напруги мережі, то замість трансформатора Т (рис. 4, *а*) доцільно застосовувати автотрансформатор як економічніший.

Для ширшого діапазону коливань напруги мережі, наприклад +1,15...–0,8 $U_{с.ном}$, m = 1,15/0,8 = 1,4375 отримаємо χ_{min} = 0,9376. Таким чином, збільшення діапазону коливань напруги мережі зі звичайного (+10...–15 %) до максимально високого (+15...–20 %) знижує коефіцієнт потужності одноступінчастого фазоступінчастого стабілізатора потужності з високого (0,95...1) до доброго (0,8...0,95) значення (див. табл.).

Слід зазначити, що в цій схемі замість зустрічно-паралельно включених пар тиристорів неможна використовувати симетричні тиристори (семистори). У симетричних тиристорах одним імпульсом

відмикаються обидва зустрічно-паралельно включених тиристора, а струм проводить лише той, у якого в даний момент позитивна напруга на аноді.

Додавання ще одного ступеня з m = 1,38 (рис. 4, *б*) дозволяє розширити діапазон регулювання напруги до 100...52,5 % ($U_{min} = 1/m^2 = 0{,}525\ U_{max}$), рис. 4, *б*), криві $1\chi_m$ і $2\chi_m$ при тих же $\chi_{min} = 0{,}95$ і $\chi_{ср} = 0{,}9796$ (рис. 4, *з*).

Мінімальну вихідну напругу двоступінчастої системи регулювання можна знизити до 0,5 шляхом збільшення коефіцієнта перемикання m. Оскільки $U_{min} = 1/m^2$, то для $U_{min} = 0{,}5$ (крива $1U_m$ на рис. 4, *д*) отримаємо m = 1,414. На жаль при цьому зменшиться коефіцієнт потужності до $\chi = 0{,}94$ (криві $1U_m$ і $2U_m$ на рис. 4, *з*).

Простіше за все розширити діапазон регулювання вихідної напруги схеми можна шляхом деякої модернізації алгоритму управління. У схемі рис. 4, *б*, як і в схемі рис. 4, *а*, тиристори VS1 і VS2 працюють тільки в повнофазному режимі з $\alpha = 0$ (рис. 5). Тоді при збільшенні кута ввімкнення тиристорів VS1, VS2 з 0 до 0,27π отримаємо $U_{min} = 0{,}5$ при $\chi_{min} = 0{,}952$ згідно з рис. 3.

Схема також дозволяє плавно знижувати вихідну напругу аж до нуля, збільшуючи кут ввімкнення тиристорів VS1, VS2 до π. Таку схему можна розглядати як чотириступінчасту у вигляді комбінації схем з фазоступінчастим регулюванням (ступені II, III) і схеми з фазоімпульсним регулюванням (I ступінь). Правда, при цьому коефіцієнт потужності на першому ступені пропорційно знижується аж до нуля внаслідок переходу на фазоімпульсне регулювання. Таке регулювання є допустимим, якщо є потреба у низькій вихідній напрузі джерела живлення лише короткочасно.

У більшості практичних випадків можна прийняти це рішення як найпростіше та разом з тим таке, що забезпечує високе значення χ і достатньо широкий діапазон регулювання напруги.

Щоби збільшити коефіцієнт потужності вище 0,95 у діапазоні регулювання вихідної напруги 1...0,5 і вище, необхідно додати четвертий ступінь фазоімпульсного регулювання вихідної напруги (рис. 4, *в*).

Для цього регулятора з діапазоном регулювання напруги 1...0,5 повинна виконуватися умова $1/m^3 = 0{,}5$. Звідси $m = \sqrt[3]{\dfrac{1}{0{,}5}} = 1{,}26$. На рис. 4, *е* наведено регулювальні характеристики напруги регулятора. Як бачимо, на першому ступені мінімальна напруга $U_{min} = 0{,}5U$ (крива $1U_m$). Тоді згідно з залежністю для $\chi_{min}(m)$ мінімальне значення коефіцієнта потужності у всьому діапазоні регулювання напруги складає $\chi_{min} = 0{,}9738$ (рис. 4, *і*, криві $1U_m$, $2U_m$, $3U_m$), а середнє значення $\chi_{ср} = 0{,}9893$. При однаковому з триступінчастою схемою коефіцієнті потужності $\chi_{min} = 0{,}95$ (рис. 4, *і*, криві $1\chi_m$, $2\chi_m$, $3\chi_m$) діапазон регулюємої напруги суттєво розширюється – $U_{min} = 0{,}38$ (рис. 4, *е*, крива $1\chi_m$).

Як і триступінчаста, чотириступінчаста схема фазоступінчастого регулювання також дозволяє плавно знижувати вихідну напругу аж до нуля, збільшуючи кут ввімкнення тиристорів VS1, VS2 до π.

Розглянуті системи плавного безперервного тиристорного регулювання змінної напруги є ідеальними для модернізації найпоширеніших трансформаторних джерел живлення зі ступінчастим регулюванням для ЕШЗ/ЕШП (рис. 1, *а*).

При цьому, по-перше, збільшується надійність джерел живлення внаслідок заміни електромеханічних контакторів електронними приладами – тиристорами, а кількість комутуючих елементів може навіть зменшуватись; по-друге, технологічні можливості установок значно покращуються внаслідок плавного регулювання напруги, розширення діапазону регулювання напруги, автоматичної стабілізації незалежно від збурень, наприклад коливань напруги мережі живлення, заданих або тих, що програмно змінюються, електричних параметрів технологічного процесу.

Висновки

1. Для електрошлакових технологій переважно застосовуються джерела живлення змінного струму зі ступінчастим регулюванням вихідної напруги. Їх недоліком є складність при широкому діапазоні регулювання вихідної напруги.

2. Для плавного регулювання напруги використовуються джерела живлення з фазоімпульсними тиристорними регуляторами. Вони простіше джерел живлення зі ступінчастим регулюванням, але мають неприпустимо низький коефіцієнт потужності, який зменшується пропорційно напрузі, що регулюється, аж до нуля.

3. Задовільний коефіцієнт потужності в широкому діапазоні плавного регулювання вихідної напруги мають джерела живлення з фазоступінчастим регулюванням напруги.

4. При коефіцієнті перемикання m = 1,38 незалежно від кількості ступенів отримаємо мінімальне значення коефіцієнта потужності джерела живлення $\chi_{min} = 0{,}95$ в усьому діапазоні регулювання напруги при середньому значенні $\chi_{ср} = 0{,}98$.

5. Для двоступінчастої схеми при m = 1,38 мінімальна відносна вихідна напруга $U_{min} = 0{,}725$. Низький діапазон регулювання вихідної напруги обмежує область застосування двоступінчастої

схеми стабілізаторами напруги мережі в діапазоні її зміни +10…–15 %.

6. Для триступінчастої схеми при m = 1,38 маємо U_{min} = 0,525. Ця схема з-за своєї простоти при високих регулювальних та енергетичних характеристиках є оптимальною для більшості джерел живлення ЕШЗ/ЕШП.

7. Якщо потрібно мати ширший діапазон регулювання вихідної напруги, можна використовувати джерела живлення з чотириступінчастою системою фазоступінчастого регулювання, що при m = 1,38 забезпечує U_{min} = 0,38.

8. Для нетривалих режимів та операцій в джерелах живлення з фазоступінчастим регулюванням, використовуючи фазоімпульсне регулювання тиристорами верхньої відпайки мережевої обмотки трансформатора, можна забезпечити плавне зниження мінімальної вихідної напруги аж до нуля, але з відповідним зниженням коефіцієнта потужності.

9. Системи фазоступінчастого регулювання дуже добре підходять для модернізації джерел живлення ЕШЗ/ЕШП зі ступінчастим регулюванням. Заміна електромеханічних контакторів на тиристорні із системою управління підвищує надійність, технологічні можливості установок, забезпечує підвищення стабільності якості продукції, що випускається, з-за стабілізації параметрів заданого технологічного режиму незалежно від збурень, що діють на процес (коливань напруги мережі тощо).

Список літератури

1. (1980) Электрошлаковая сварка и наплавка. Патон Б.Е. (ред.) Москва, Машиностроение.
2. Бондаренко О.П., Гавриш В.С., Дишленко О.Т. та ін. (1994) *Автоматичне керування електрозварювальними процесами і установками. Навч. посібник.* Лебедєв В.К., Черниш В.П. (ред.). Київ, Вища школа.
3. Бергман Л.Дж. (1972) *Система питания и управления оборудованием для электрошлакового переплава железа и стали в Швеции.* Специальная электрометаллургия. Часть II. Доклады Международного симпозиума по специальной электрометаллургии. Киев, Наукова думка.
4. Медовар Л.Б., Полішко Г.О., Петренко В.Л., Стовпченко Г.П. (2020) Сучасні електрошлакові технології переплаву електроду та переробка рідкого металу (Огляд). *Теорія і практика металургії*, **2**, 17–25. DOI: https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03
5. Билоус О.А., Иванов А.П. (2009) *Электронные преобразовательные устройства. Учеб. пособие*. Пермь, Изд-во Перм. гос. техн. ун-та.

References

1. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. Ed. by B.E. Paton, Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Bondarenko, O.P., Havrysh, V.S., Dyshlenko, O.T. et al. (1994) *Automatic control of electric welding processes and installations In: Manual*. Eds by V.K., Lebedev, V.P., Chernysh. Kyiv, Vyshcha Shkola [in Ukrainian].
3. Bergman, L.J. (1972) *System of power supply and control of equipment for electroslag melting of iron and steel in Sweden*. Special electrometallurgy. *Pt II. In: Proc. of the Intern. Symp. on Special Electrometallurgy*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Medovar, L., Polishko, G., Petrenko, V., Stovpchenko, G. (2020) Modern electroslag technologies of electrode remelting and processing of liquid metal (Review). *Theory and Practice of Metallurgy*, **2**, 17–25. DOI: https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03 [in Ukrainian].
5. Bilous, O.A., Ivanov, A.P. (2009) *Electronic conversion devices. Study allowance*. Perm, Publishing Perm Techn. Univ. [in Russian].

CHARACTERISTICS OF POWER SOURCES OF ESW/ESM INSTALLATIONS WITH PHASE-PULSE REGULATION OF THYRISTORS

Yu.M. Lankin, V.F. Semikin, Ye.M. Bayshtruk, I.Yu. Romanova

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

The characteristics of transformer power sources with phase-pulse regulation of thyristor contactors, which provide smooth voltage regulation, are considered. Their main drawback is an unacceptably low power factor. The characteristics and recommended areas of application of two-, three- and four-stage power sources with phase-step regulation, which have a high power factor in a wide range of voltage regulation, are considered. Phase-step regulation systems are very well suited for upgrading the existing power supplies with step regulation, increasing the quality of the manufactured products and the technological capabilities while maintaining high energy characteristics. 5 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: electroslag technologies, alternating current power sources, phase-pulse regulation, phase-step regulation, power factor

Отримано 15.10.2024
Отримано у переглянутому вигляді 13.11.2024
Прийнято 12.12.2024

ЗАСТОСУВАННЯ ОФІЦІЙНИХ ТЕКСТІВ НАЦІОНАЛЬНИХ ТА МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ

Згідно з розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26.11.2014 № 1163-р «Про визначення державного підприємства, яке виконує функції національного органу стандартизації» функції національного органу стандартизації виконує державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (далі – ДП «УкрНДНЦ»). ДП «Укр-НДНЦ» також уповноважено представляти інтереси України в Міжнародній організації зі стандартизації (ISO).

Відповідно до ч. 2 ст. 11 Закону України «Про стандартизацію» (далі – Закон про стандартизацію) до повноважень національного органу стандартизації належить, зокрема, прийняття, скасування та відновлення дії національних стандартів. Ч. 1 ст. 24 Закону про стандартизацію передбачає, що національні стандарти, кодекси усталеної практики, зміни до них і розроблені національним органом стандартизації каталоги видаються, відтворю ються та розповсюджуються національним органом стандартизації.

Отже, в Україні повноваження на видання, відтворення та розповсюдження національних стандартів надано ДП «УкрНДНЦ». Видання, відтворення та розповсюдження міжнародних стандартів регулюється ч. 2 ст. 24 Закону про стандартизацію. Видання, відтворення та розповсюдження документів міжнародних і регіональних організацій стандартизації, членом яких є національний орган стандартизації, здійснюються зазначеним органом відповідно до правил таких організацій.

Такими правилами є ISO POCOSA 2017 «Політики розповсюдження, продажу та копіювання публікацій та захист авторського права ISO», схвалені Резолюцією Ради ISO08/2017 (далі – ISO POCOSA 2017), що визначають умови стосовно відтворення та розповсюдження публікацій ISO і пов'язані з ними метадані щодо публікацій ISO. Відповідно до п. 4.4. ISO POCOSA 2017 кожен член ISO повинен сумлінно вживати всіх економічно доцільних заходів, дозволених законодавством, застосовним на їхній національній території, щоб запобігти, зокрема, несанкціонованому використанню вмісту будь-якої публікації ISO. П. 5.1 ISO POCOSA 2017 встановлено, що на одній національній території є лише один член ISO. При цьому відповідно до п. 6.2 ISO POCOSA 2017 члени ISO несуть основну відповідальність за продаж і розповсюдження публікацій ISO, національних стандартів на своїх національних територіях. Члени ISO можуть продавати публікації ISO у різних мовних версіях.

Продаж оригінальних публікацій ISO підлягає сплаті роялті.

Ч. 1 ст. 25 Закону про стандартизацію встановлено, що право власності на національні стандарти, кодекси усталеної практики та розроблені національним органом стандартизації каталоги належить державі. Ч. 3 ст. 25 Закону про стандартизацію забороняється повністю чи частково видавати, відтворювати з метою розповсюдження та розповсюджувати як офіційні видання будь-які національні стандарти або їх частини на будь-яких носіях інформації без дозволу національного органу стандартизації чи уповноваженої ним особи.

Відповідно до абзацу 2 ст. 1 Закону України «Про акредитацію органів з оцінки відповідно сті» акредитація органів з оцінки відповідності (далі – ООВ) – засвідчення національним органом України з акредитації того, що орган з оцінки відповідності відповідає вимогам національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, або вимогам міжнародних чи європейських стандартів, та у разі необхідності будь-яким додатковим вимогам щодо акредитації у відповідних сферах для провадження визначеної діяльності з оцінки відповідності.

Відповідно до ст. 1 Закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» орган з оцінки відповідності – орган (підприємство, установа, організація чи їх структурний підрозділ), що здійснює діяльність з оцінки відповідності, включаючи калібрування, випробування, сертифікацію та інспектування, а оцінка відповідності – процес доведення того, що задані вимоги, які стосуються продукції, процесу, послуги, системи, особи чи органу, були виконані.

Отже, з урахуванням ст. 25 Закону про стандартизацію, Національне агентство з акредитації України (НААУ) для засвідчення відповідності ООВ вимогам національних стандартів, а ООВ в рамках діяльності з оцінки відповідності вимогам національних стандартів повинні використовувати офіційні тексти відповідних національних стандартів.

Крім того, фізичні або юридичні особи, що застосовують у своїй діяльності національні стандарти, повинні використовувати їх офіційні тексти.

Відповідно до чч. 4, 5 ст. 25 Закону про стандартизацію у разі видання, відтворення чи розповсюдження національного стандарту або його частини без дозволу національного органу стандартизації (ДП «УкрНДНЦ») зазначений орган не несе відповідальності за невідповідність тексту розповсюджуваного документа його офіційному тексту чи за наслідки, спричинені застосуванням розповсюдженого документа.

Національний орган стандартизації (ДП «УкрНДНЦ») має право на відшкодування збитків, завданих йому недозволеним виданням, відтворенням та розповсюдженням національного стандарту або його частини, відповідно до закону (ч. 5 ст. 25 Закону про стандартизацію).

ДП «УкрНДНЦ» забезпечує перевірку, підтвердження текстів національних, міжнародних чи європейських стандартів щодо їх офіційного статусу, а також видання, відтворення та розповсюдження офіційних текстів національних стандартів.

Джерело: https://me.gov.ua
(сайт Міністерства економіки України)

ВИСТАВКА ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ INNOTRANS 2024

З 24 по 27 вересня 2024 р. у місті Берлін, Німеччина відбулась чергова, провідна міжнародна виставка транспортних технологій InnoTrans 2024.

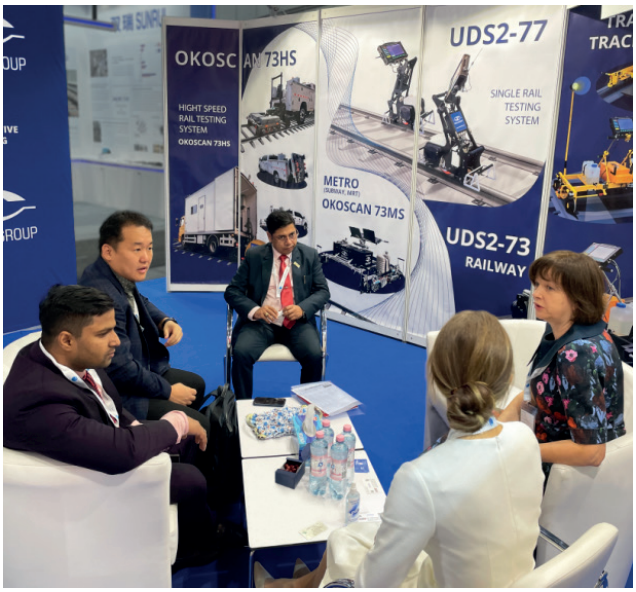
З моменту першого проведення у 1996 р. виставка InnoTrans є провідним міжнародним оглядом рейкового транспорту та орієнтована на фахівців галузі. InnoTrans проводиться кожні два роки у виставковому центрі Messe Berlin, який має відкриті залізничні колії, які можна використовувати для експонування залізничних транспортних засобів.

У виставці InnoTrans 2024 р. прийняло участь понад 137400 відвідувачів зі 137 країн та було представлено понад 2771 експонентів із 56 країн. Унікальна концепція InnoTrans, що включає експозицію просто неба, спеціалізовану виставку в павільйонах і велику програму конференцій InnoTrans Convention, стала визначальним чинником успіху цього провідного галузевого форуму. На виставці були представлені наступні розділи: залізничні технології; залізнична інфраструктура; вну-

Демонстрація обладнання для зварювання залізничних рейок, компанія SaZ s.r.o, Чехія

трішнє оснащення рухомого складу; громадський пасажирський транспорт; будівництво тунелів.

На виставці був представлен Національний павільйон України, організований за підтримки партнерів: громадської організації Unite Ukraine у співпраці з Офісом з розвитку підприємництва та експорту, проєктом Дія.Бізнес, міжнародної платформою NAZOVNI та за підтримки посольства України у Німеччині. На Національному павільйоні України були розміщенні експозиції наступних компаній: ТОВ «НВО «А.Т.О.Р.», ТОВ «ДДАП-РАКС», АТ «ДНІПРОВСЬКИЙ СТРІЛОЧНИЙ ЗАВОД», ТОВ «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС», ТОВ «ЕДВАНТІС УКРАЇНА», ТОВ «ДМЗ «КАРПАТИ», ТОВ «ПОЛТАВСЬКИЙ ТЕПЛОВОЗОРЕМОТНИЙ ЗАВОД», ТДВ «СТРИЙ АВТО», ТОВ «БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ ЗАВОД «ТРІБО», ПП «НВФ «УКРАЇНСЬКА ВАГОВА КОМПАНІЯ», ТОВ «УКРСХІДІНДУСТРІЯ».



На стенді компанії OKOndt GROUP як завжди багато відвідувачів

Компанії-учасники павільйону провели 560 зустрічей з імпортерами й дистриб'юторами з країн ЄС та Близького Сходу, налагодили сотні релевантних контактів з потенційними замовниками, а компанія «Стрий Авто» отримала замовлення на постачання сидінь для польських трамваїв. Національний павільйон України відвідала делегація Єврокомісії, Надзвичайний і Повноважний Посол України у Федеративній Республіці Німеччина Олексій Макеєв та представники Deutsche Bahn AG.

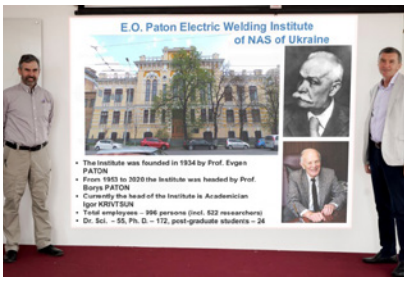
Технології та обладнання ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в галузі контактного стикового зварювання залізничних рейок були представлені такими провідними компаніями, як: YARDWAY Railquip LTD, Гонконг; SAS SCULFORT YEL, Франція; SaZ s.r.o., Чехія; RW Equipment & Consulting LLC, США; Holland L.P., США.

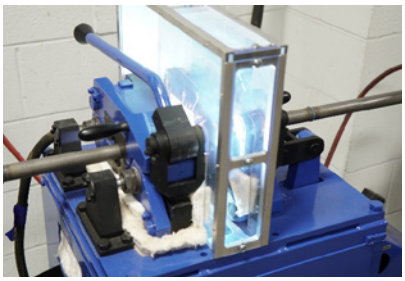
Також, свої розробки в галузі контактного стикового зварювання залізничних рейок продемонстрували Schlatter Industries AG, Швейцарія; Plasser & Theurer, Австрія; Contrail Machinery SRL, Румунія.

На виставці компанія OKOndt GROUP з м. Київ представляла ручні, механізовані та швидкісні засоби для контролю рейкового шляху, а також ручні прилади та автоматизовані системи контролю елементів рухомого складу.

Олександр Кавуніченко

ВИСТАВКА FABTECH-2024





Презентація розробок ІЕЗ з демонстрацією процесу зварювання в компанії Arc Specialties, Х'юстон, США

На запрошення Dan Allford, президента Arc Specialties, США, в рамках довгострокової співпраці з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ), у жовтні 2024 р. відбувся діловий візит до США провідного наукового співробітника ІЕЗ Володимира Качинського. Програма візиту включала презентації останніх результатів роботи ІЕЗ щодо наукових досягнень у розробці передових технологій та їх промисловому застосуванні. Під час візиту були проведені презентації в компаніях Arc Specialties та American Society Metals (ASM International) за підтримки Jean-Marc Tetevuide, спеціаліста з розвитку бізнесу компанії Har-Bach Fusion Technology, для представників наукових організацій та промислових компаній США. ASM International – це асоціація для залучення фахівців у галузі матеріалознавства для вирішення науково-технічних завдань. Загальна кількість присутніх склала близько 120 осіб.

14 жовтня ІЕЗ був представлений та взяв участь у роботі пленарного засідання Американського зварювального товариства (AWS). Під час роботи AWS було проведено декілька зустрічей, у тому числі з президентом AWS у 2003 р. Ernest Levert Sr., президентом AWS у 2013 р. Nancy C. Cole та майбутнім президентом AWS у 2025 р. Richard Holdren.

Крім того, з 15 по 17 жовтня на виставці FABTECH-2024 в Орландо була представлена розробка ІЕЗ — устаткування для пресового зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) з демонстрацією процесу зварювання труб. Розроблений в ІЕЗ процес ПЗМД було включено до 60 «найкрутіших» демонстрацій технологій в одному відео, представленому на FABTECH, за словами відомого експерта Jake Hall з компанії The Manufacturing Millennial. FABTECH Expo це найбільша в Північній Америці подія з обробки металу тиском, виготовлення та зварювання.

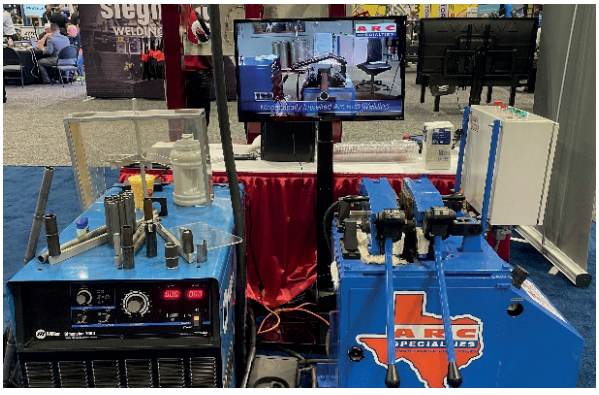
На виставці FabTech-2024 понад 1500 компаній з 35000 експонентами продемонстрували свої продукти та послуги на площі 750000 квадратних

Презентація розробок ІЕЗ для ASM International, Х'юстон, США

Зустріч з Nancy C. Cole, президент AWS у 2013 р.

Зустріч з Mr. Ernest Levert Sr., президент AWS у 2003 р.

Зустріч із Richard Holdren, майбутнім президентом AWS у 2025 р., Dan Allford, президент Arc Specialties, Володимир Качинський, ІЕЗ



Зварювальний апарат ПЗМД був представлений Володимиром Качинським на виставці FABTECH 2024 в Орландо з демонстрацією процесу живого зварювання

футів. Незважаючи на погану погоду, спричинену ураганом Ірма, який обрушився на Орландо, штат Флорида, FabTech мав приголомшливий успіх. Подія привернула значну кількість експонентів і відвідувачів, які висловили свій оптимізм щодо майбутнього виробництва в усьому світі та в Сполучених Штатах. Помітною родзинкою цьогорічної FabTech стала демонстрація роботів-колаборантів (коботів). Незважаючи на те, що дугове зварювання традиційно не асоціюється з коботами, спільний характер коботів у поєднанні з його здатністю відчувати контакт з людиною та вимикати його, перш ніж завдати шкоди, підвищує безпеку зварювальних робіт. Повторні, рутинні та ергономічно складні завдання можуть бути виснажливими та небезпечними для працівників практично в будь-якому виробничому середовищі. Коботи можуть значно підвищити рівень продуктивності шляхом автоматизації практично будь-яких ручних завдань, включаючи невеликі партії або швидкі зміни. Крім того, коботи можуть повторно використовувати програми для виконання невеликих повторюваних завдань. Очікується, що в найближчі роки участь коботів буде широко поширена, особливо у сферах зварювання та різання. Ця тенденція супроводжується зменшенням кількості виробників, оскільки поточний ринок переповнений новими учасниками, багато з яких можуть не витримати конкуренції більше кількох років.

Іншим напрямком інновацій, представлених у FabTech, був 3D-друк або адитивне виробництво (АВ). У той час як АВ часто сприймається як нова технологія, зварювання є однією з новаторських адитивних технологій. АВ швидко переходить від новинки до життєздатного методу виробництва. Значна частина робіт передбачає використання дугового зварювання з використанням дротів, процес, відомий як дугове адитивне виробництво (wire-arc additive manufacturing - WAAM).

У той час, як тривають значні дослідження щодо розробки кодів і специфікацій для цієї нової технології, а також вимірювання властивостей матеріалів у друкованих деталях, є простір для інновацій у використанні інших процесів зварювання з вищою швидкістю наплавлення, ніж традиційний GMAW. Високопродуктивним кандидатами на АВ є електрошлакове та дугове зварювання під флюсом. Був значний наголос на автоматизації не тільки процесів зварювання, але й автоматизації підготовки деталей, механічної обробки, очищення, контролю після зварювання та обробки після зварювання. Майбутні виробничі клітини включатимуть більше процесів на меншій площі. Існує також помітна тенденція відходу від традиційних капіталомістких закупівель великих систем до більш доступних, недорогих моделей. Перша модель — це роботи як послуга, де постачальник зберігає право власності та просто надає обладнання за плату протягом обмеженого часу, що дозволяє виробникам використовувати переваги робототехніки без значних капіталовкладень. Це також виправдовує використання роботів для коротших виробничих циклів. Друга модель – орендовані роботи. У цій моделі виробник зберігає право власності, а також відповідальність за моніторинг, оновлення програмного забезпечення та обслуговування. Це також усуває ризик великих капітальних витрат. Цілком імовірно, що обидві ці моделі стануть більш поширеними в майбутньому.

На стенді компанії Arc Specialties ми з гордістю продемонстрували кілька інноваційних технологій. Першою технологією була концепція використання традиційних роботів у небезпечних середовищах, таких як бурові судна в Мексиканській затоці, щоб замінити людей у фізично складних і небезпечних завданнях. Зробивши роботів мобільними, відкриваються численні можливості для роботи зі стаціонарними або надто великими деталями, які було б економічно недоцільно переміщати вручну. Другою технологією були роботи, здатні як зварювати, так і різати в польових умовах на рухомій магнітній основі. У цій програмі використовувався робот для співпраці, який покращив

безпеку та забезпечив мобільність у обмеженому просторі, працюючи однією рукою. Третя інновація на виставці було представлено технологію пресового зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД), розроблену в ІЕЗ. Нам пощастило, що Володимир Качинський, старший науковий співробітник ІЕЗ, який брав участь у його розробці, представив і продемонстрував цю унікальну технологію. ПЗМД відносно невідомий у Сполучених Штатах, і відвідувачі були вражені його здатністю зварювати труби малого діаметру менш ніж за чотири секунди, що зазвичай займає години за допомогою традиційних методів. Загалом виставка підкреслила швидкий темп технологічного прогресу. Комп'ютери, датчики та роботи стають швидшими, ефективнішими та доступнішими, дозволяючи нам вирішувати раніше неможливі проблеми. Автоматизація контролю якості забезпечує більшу послідовність вимірювань і підтримку високого рівня якості продукції. Повторюваність плеча кобота +/- 0,03 мм (ідеально підходить для автоматизації високоточних операцій контролю якості та тестування. Однак не менш важливо підтримувати чітке розуміння процесів, параметрів і процедур зварювання, щоб забезпечити успіх. Незважаючи на виклики, спричинені пандемією COVID-19, виставки залишаються незамінними платформами для зв'язку постачальників технологій із кінцевими користувачами. Таким чином, ми очікуємо, що торговельні виставки й надалі відіграватимуть ключову роль у майбутньому галузі.

Володимир Качинський, ІЕЗ,
Dan Allford, президент, Arc Specialties

МІЖНАРОДНА ПРОМИСЛОВА ВИСТАВКА В м. БРНО

З 8 по 11 жовтня 2024 р. у м. Брно (Чеська Республіка) відбулася 65-та Міжнародна промислова виставка «The MSV International Engineering FAIR», в якій брала участь делегація з м. Києва для демонстрації промислового потенціалу столиці України під назвою «Made in Kyiv».

Захід відбувся за фінансової і технічної підтримки Київської міської державної адміністрації (КМДА) і Торгово-промислової палати України (ТПП). У складі делегації було 10 компаній, а саме: ТОВ фірма «Плазма-Мастер Лтд», ТОВ «Патон Інтернешнл», ТОВ «Сторожук» (UASTAL), ПрАТ «Промзв'язок», ТОВ «Конструкторське бюро контрольних приладів», Інститут технічної теплофізики НАН України, ТОВ «Науково-виробниче товариство «Дніпро-МТО», ТОВ «Науково-виробнича фірма «Ірком-ЕКТ», ТОВ «Техсервіс ВЕКО і партнер ГМБХ» (TWEKO) і ТОВ «Пролог Семікор».

Свої кращі досягнення учасники делегації змогли продемонструвати на об'єднаному стенді «Made in Kyiv», який було організовано в одному з центральних павільйонів виставки. З галузі

Виставковий павільйон

Стенд фірми «Плазма-Мастер Лтд»

Стенд ТОВ «Патон Інтернешнл»

Президент Чеської Республіки Петр Павел

Прем'єр-міністр Чеської Республіки Петр Фіала та Надзвичайний і Повноважний Посол України в Чеській Республіці Василь Зварич

зварювального виробництва були представлені дві компанії – ТОВ фірма «Плазма-Мастер Лтд» і ТОВ «Патон Інтернешнл». Перша показала свої кращі моделі плазмотронів для внутрішнього та зовнішнього плазмово-порошкового наплавлення високолегованих сплавів, а також зразки наплавлених деталей, друга – представила свій новітній напівавтомат для електродугового зварювання, а також витратні зварювальні матеріали (дріт і покриті електроди).

У рамках роботи експозиції «Made in Kyiv» і ділової програми візиту було організовано українсько-чеський бізнес-форум «Contact Ukraine», у якому взяли участь з чеської сторони: Мартін Поспішіл, директор Департаменту Європейських країн Міністерства промисловості та торгівлі Чеської Республіки, а з української – В.В. Костіков, директор Департаменту промисловості та розвитку підприємництва КМДА.

Український стенд «Made in Kyiv» відвідали: Петр Павел – президент Чеської Республіки, Петр Фіала – прем'єр-міністр Чеської Республіки, Василь Зварич – Надзвичайний і Повноважний Посол України в Чеській Республіці. Вони тепло привітали учасників виставки від України та побажали успіхів у пошуку партнерів і встановленні нових контактів.

У рамках заходу для української делегації було організовано екскурсію на одне з місцевих підприємств «FERMAT Machine Tool s.r.o.», яке виробляє великогабаритні оброблювальні центри. Ми отримали дуже сильне враження відносно технічного рівня продукції, яке виготовляється та експортується в різні країни світу. Хотілося, щоб в Україні також з'являлись такі підприємства.

У цілому виставка пройшла достатньо жваво та корисно. Багато відвідувачів цікавились продукцією, яку демонстрували українські виробники. Це дає надію на появу конкретних замовлень. Слід також відзначити високий рівень організації проведення виставки для української делегації, за що велика подяка КМДА, ТПП України та безпосередньо керівникам делегації.

Учасник виставки – директор фірми «Плазма-Мастер Лтд»
Олександр Сом

ЧЕСЬКА КОМПАНІЯ SAZ s.r.o. – НАДІЙНА ТЕХНІКА ДЛЯ ЗАЛІЗНИЦІ

SaZ s.r.o. – чеська машинобудівна компанія, яка з 1954 р. спеціалізується у проєктуванні, виробництві та ремонті спеціальної дорожньої та залізничної техніки, машин на комбінованому автомобільно-залізничному ходу (дводорожніх машин), зокрема рейкових машин з телескопічними підйомними платформами, ізольованими платформами для роботи із контактними дротами та рейкоукладачами, машин для контактного зварювання рейок, укладачів колій та іншого обладнання, призначеного для обслуговування залізничних і трамвайних колій.

До асортименту продукції компанії SaZ s.r.o. входять залізничні платформи та транспортери, залізничні візки, кузовні надбудови, навантажувальні рампи тощо.

Дводорожня техніка компанії SaZ s.r.o. виконує завдання з оновлення та будівництва колій, прибирання залізничного полотна від піску, бруду, снігу, обслуговування та оновлення ліній електропере-

Машина на комбінованому автомобільно-залізничному ходу DUOLINER MIJ призначена насамперед для проведення експертних робіт на мостових конструкціях, діагностики та детального обстеження як автомобільних, так і залізничних мостів

Дводорожня машина R DUOTRAM H застосовується на автомобільних дорогах, залізничних і трамвайних коліях переважно для обслуговування контактних ліній

Дводорожня машина IT DUOLINER оснащена робочою платформою з ножицями для виконання робіт із технічного обслуговування залізниці, гідравлічним краном та вимірювальним пантографом

дач. Також у лінійці продукції компанії є спеціальні дводорожні пожежні машини.

Основними клієнтами компанії SaZ s.r.o. є великі міжнародні будівельні компанії, муніципальні транспортні компанії, пожежні та рятувальні служби, а також невеликі компанії, що займаються обслуговуванням і ремонтом залізничних і трамвайних ліній.

З 2011 р. компанія SaZ s.r.o. також зосередилась на інжинірингу, а саме: будівництві автомагістралей, доріг, залізниць, нерухомості та інших будівельних роботах.

За ці роки компанія SaZ s.r.o. зросла та стала одним із основних постачальників дорожньої техніки не тільки в Чехії та Словаччині, а й у багатьох країнах, наприклад, у Данії, Італії, Угорщині, Польщі, Німеччині, Франції, Іспанії, Австрії, Болгарії, Латвії, Литві, Індії, Австралії, Азербайджані, Україні, Гані, Ізраїлі та ін.

Постійні інвестиції у дослідження та розробки дозволяють компанії SaZ s.r.o. пропонувати інноваційні та високоякісні продукти, що відповідають найвищим технічним стандартам і вимогам клієнтів. Сучасні виробничі потужності та команда кваліфікованих фахівців гарантують, що кожен продукт, який виходить із цехів компанії, є гарантією надійності та продуктивності.

Сертифікація компанії

Окрім сертифікатів системи управління якістю ISO 9001:2015, сертифікатів системи управління навколишнім середовищем ISO 14001:2015 і сертифікату відповідності менеджменту виробництва EN ISO 3834-2:2005, компанія SaZ s.r.o. також має також інші сертифікати, які демонструють високий стандарт якості.

Україно-чеське співробітництво

Сімдесятирічний досвід успішної роботи компанії SaZ s.r.o. дав можливість вирішити актуальну проблему – створення ефективного устаткування для зварювання залізничних рейок. У 2023 р. компанією SaZ s.r.o. у тісному співробітництві з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України успішно налагоджено виробництво дводорожних (double-track) рейкозварювальних комплексів WELDERLINER, оснащених мобільними машинами К922-1 для контактного стикового зварювання оплавленням (FBW).

Компанія SaZ s.r.o., яка раніше не спеціалізувалась на зварювальному устаткуванні, у надзвичайно стислі терміни впровадила у виробництво FBW машин К922-1, забезпечивши при цьому надзвичайно високу якість виготовлення.

Мобільна (підвісна) машина К922-1 є оригінальною розробкою ІЕЗ ім. Є.О. Патона та реалізує інноваційну технологію контактного стикового зварювання пульсуючим оплавленням. Машини К922-1 оснащені сучасною комп'ютеризованою системою багатофакторного контролю параметрів зварювання, швидкодіючими гідроприводами, а також ріжучим пристроєм, який видаляє грат у гарячому стані без розтискання звареної ділянки рейок. При цьому зварний стик може утримуватись протягом часу, необхідного для охолодження з'єднання до заданої температури. Машини К922-1 у складі мобільних рейкозварювальних комплексів протягом десятків років у багатьох країнах світу на всіх континентах успішно використовуються як для будівельних, так і ремонтних робіт на будь-яких типах і розмірах рейок.

Дводорожні зварювальні комплекси WELDERLINER, оснащені машинами К922-1, відповідають всім вимогам міжнародних стандартів безпеки щодо якості зварних стикових з'єднань рейок і вимогам екологічних показників ЄС.

Компанія SaZ s.r.o. успішно виконала контракти на поставку декількох рейкозварювальних комплексів WELDERLINER замовникам з країн ЄС.

Ці комплекси успішно пройшли всебічні випробування, передбачені європейським стандартом EN 14587-2:2009.

Для України як держави з надзвичайно розгалуженою мережею залізничних колій впровадження комплексів WELDERLINER, укомплектованих сучасними мобільними машинами К922-1, є надзвичайно актуальним. Компанія SaZ s.r.o. забезпечує обслуговування комплексів WELDERLINER, навчання операторів та технічного персоналу. Усі випробувальні, налагоджувальні роботи рейкозварювальних комплексів компанії SaZ s.r.o. проводяться за участю фахівців ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

https://www.saz.cz

«ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» – ПІДСУМКИ РОКУ ТА ІННОВАЦІЇ ДЛЯ МАЙБУТНЬОГО

2024 рік став для «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» періодом значних досягнень у виробництві зварювальних матеріалів. Завдяки акценту на якості, інноваціях і розширенні асортименту, підприємство зміцнило свої позиції на внутрішньому та міжнародному ринках. Продукція заводу, включаючи марки G3Si1 **та G4Si1**, завоювала довіру замовників у різних галузях економіки — від будівництва до машинобудування.

З моменту запуску новітніх сучасних ліній з виробництва зварювального дроту від шведського виробника Lämneå Bruk AB, за короткий час та в умовах війни, напрямок виробництва і продажів зварювального дроту здобув лідерські позиції серед українських виробників, досягнувши обсягів понад 1500 тон на рік.

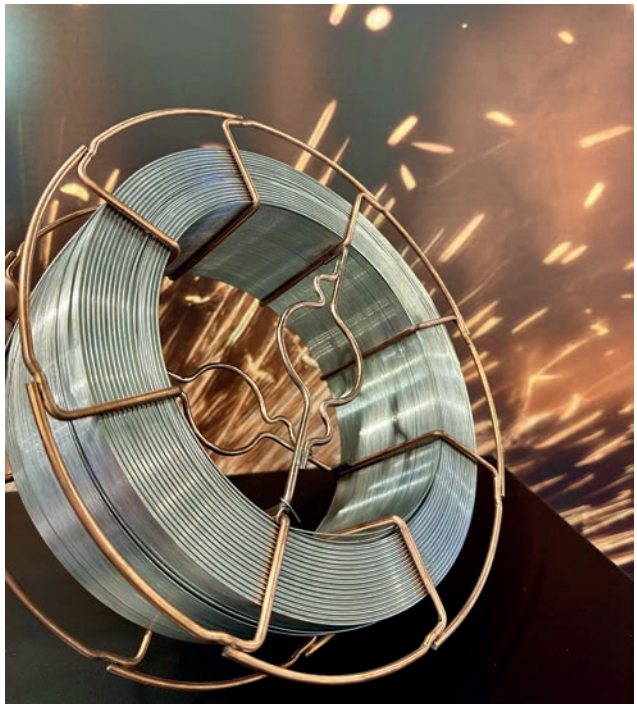
Розширення асортименту продукції. У відповідь на потреби сучасних виробництв, «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» запропонував широкий вибір зварювального дроту:

- **Обміднений дріт G4Si1**, G3Si1 діаметрами від 0,8 мм до 2,0 мм на касетах вагою 15, 5, 2,5 та 1 кг. Прецизійне намотування забезпечує стабільність подачі дроту у процесі зварювання.
- **Полірований дріт без покриття**, доступний у діаметрах 0,8 мм, 1,0 мм, 1,2 мм та 1,6 мм на касетах 15 і 18 кг.
- **Дріт для роботизованих комплексів** у діжках вагою 250 кг. Така упаковка забезпечує ефективність виробничих процесів на великих підприємствах.

Розширення міжнародного впливу. Одним із ключових досягнень року стала акредитація в Deutsche Bahn . Як один з найбільших транспортних операторів в Європі та у світі, Deutsche Bahn є важливим учасником у галузі мобільності та має авторитет і суттєвий вплив на розвиток і формування транспортного сектора. Це підтверджує відповідність продукції заводу найвищим стандартам якості Європейського Союзу. Окрім цього, наш зварювальний дріт успішно пройшов випробування в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона, що відкриває нові перспективи у будівництві сталевих мостів.

Завод також активно представляв свої рішення на провідних міжнародних виставках, таких як Wire 2024 Дюсельдорф, XXII Міжнародний Промисловий Форум у Києві, WeldTech 2024 у Варшаві та Inno Trans 2024 у Берліні. Варто відзначити зацікавленість споживачів із різних країн у зварювальних матеріалах від українських виробників. Це дозволило не лише налагодити нові партнерства, обмінятися досвідом та ідеями з іншими виробниками зварювальних матеріалів, але й отримати зворотній зв'язок для вдосконалення продукції. «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» впевнено зміцнює свої позиції на закордонних ринках, презентуючи продукцію клієнтам із різних країн і підтверджуючи високий рівень маркування «MADE IN UKRAINE» на міжнародній арені.

Нові тренди в галузі. Світовий ринок зварювальних матеріалів демонструє стійкий ріст, обумовлений індустріалізацією, урбанізацією та впровадженням роботизації. Автоматизація процесів зварювання дозволяє суттєво підвищити продуктивність, якість зварних з'єднань і знизити ризики травматизму.



ТОВ «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» активно інвестує у розвиток роботизованих рішень, пропонуючи зварювальний дріт у зручній упаковці для автоматизованих ліній. У 2024 р. на підприємстві також було впроваджено нові підходи до навчання та підтримки клієнтів: наші інженери-технологи зварювального виробництва надають консультації, технічну допомогу та супровід на кожному етапі використання нашої продукції.

Якість, що перевірена часом. Зварювальний дріт ТОВ «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» відповідає міжнародним стандартам, включаючи ISO 9001, сертифікацію TÜV NORD та Deutsche Bahn. Це гарантує відмінну якість, високу міцність з'єднань, стійкість до корозії та довговічність. Наша продукція маркується знаком СЄ, що підтверджує відповідність вимогам безпеки в Європейському Союзі.

Логістика та клієнтоорієнтованість. Ефективна логістика — одна з сильних сторін заводу. Завдяки власному автопарку ми забезпечуємо швидку доставку продукції по Україні та за кордон, скорочуючи час на виконання замовлень і підвищуючи задоволеність клієнтів.

Погляд у майбутнє. ТОВ «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» продовжує інвестувати у новітні технології та вдосконалювати свої продукти. Ми впевнені, що інноваційні рішення, які пропонує наш завод, допоможуть клієнтам адаптуватися до нових викликів, забезпечуючи якість і надійність у будь-яких умовах.

Перспективи ринку зварювальних матеріалів. Глобальний ринок зварювальних матеріалів демонструє стійке зростання, і найближчими роками очікується його значне розширення. За прогнозами аналітиків, до 2030 р. обсяг ринку збільшиться завдяки широкому застосуванню для створення металоконструкцій в різних галузях економіки, таких як будівництво, зведення мостів, прокладання трубопроводів та інші інженерні проекти. Широке застосування зварювальних матеріалів у транспортній галузі, суднобудуванні та енергетиці також сприятиме росту попиту.

Інноваційні технології, такі як лазерне та роботизоване зварювання, поступово змінюють галузь. Автоматизація процесів дозволяє підвищити якість зварювальних робіт і знизити витрати. Завод «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» активно впроваджує ці тенденції, пропонуючи продукцію, що відповідає сучасним стандартам.

Ключовим фактором росту ринку є потреба в екологічно чистих і високоефективних зварювальних матеріалах. Це створює нові можливості для українських виробників, таких як «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС», що акцентують увагу на стійких технологіях та відповідності міжнародним стандартам.

Продукція заводу розроблена з урахуванням потреб сучасної індустрії, забезпечуючи високу якість з'єднань, що є критично важливим у транспортній та будівельній галузях. Враховуючи швидке зростання попиту на автоматизовані рішення, підприємство збільшує випуск зварювального дроту в бочках для роботизованих систем.

Таким чином, «ДНІПРОМЕТИЗ ТАС» не тільки відповідає сучасним викликам, але й формує нові стандарти у зварювальній галузі, забезпечуючи високоякісну продукцію та підтримуючи партнерів на кожному етапі виробничого процесу.