

# З А В Т О М А Т И Ч Н Е 2023 1 З В А Р Ю В А Н Н Я

## Автоматическая сварка

## Automatic Welding

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

### ЗМІСТ

#### МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Швец В.І., Дідковський О.В., Зяхор І.В., Антіпін Є.В., Капітанчук Л.М. Дослідження структури з'єднань рейок марки R260MN при контактному-стиковому зварюванні..... 3

Размишляев О.Д., Максимов С.Ю., Берднікова О.М., Прилипко О.О., Кушнаржова О.С., Алексеєнко Т.О. Вплив частоти зовнішнього електромагнітного поля на структуру зварних з'єднань сталі 09Г2С ..... 11

#### 3D-ДРУК

Новодранов А.С., Топчев Д.Д., Мангольд А.М., Шаповалов Є.В., Коляда В.О. Застосування зварювальних адитивних технологій при виготовленні металевих деталей складної форми (Огляд)..... 16

#### РЕМОНТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Загорніков В.І., Нестеренков В.М., Орса Ю.В., Ігнатенко А.М. Технології ремонту катодного вузла електронно-променевої гармати із застосуванням електронно-променевого зварювання..... 22

#### ЗВАРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

Маринський Г.С., Ткаченко В.А., Бисько В.О., Подпратов С.Є., Подпратов С.С., Грабовський С.Д., Ткаченко С.В. Високочастотне обладнання для зварювання живих тканин (Огляд)..... 29

#### ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Молтасов А.В., Войнарович С.Г., Димань М.М., Калужний С.М., Бурбурська С.В. Методи запобігання ефекту екранування напружень в системі імплантат-кістка (Огляд)..... 38

#### ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРІВ

Кораб М.Г., Юрженко М.В., Демченко В.Л., Мамуня Є.П. Сучасні моделі утворення зварних з'єднань полімерних матеріалів (Огляд)..... 47

#### ІНФОРМАЦІЯ

Досягнення адитивних технологій для відбудови української промисловості, науки та інжинірингу ..... 56

Успішне проведення промислових виставок в Індії..... 57

Чинні патенти ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ на винаходи ..... 58

Нові книги ..... 66

Пам'яті А.Г. Потап'євського ..... 67

### CONTENT

#### METAL SCIENCE

Shvets V.I., Didkovsky O.V., Zyakhor I.V., Antipin E.V., Kapitanchuk L.M. Study of the structure of joints of rails of R260MN grade in flash-butt welding ..... 3

Razmyshlayev O.D., Maksymov S.Yu., Berdnikova O.M., Prylypko O.O., Kushnarjova O.S., Alekseenko T.O. Influence of the frequency of external electromagnetic field on the structure of 09G2S steel welded joints ..... 11

#### 3D PRINTING

Novodranov A.S., Topchev D.D., Mangold A.M., Shapovalov E.V., Kolyada V.O. Use of welding additive Technologies in manufacture of metal parts of a complex shape (Review)..... 16

#### REPAIR TECHNOLOGIES

Zagornikov V.I., Nesterenkov V.M., Orsa Yu.V., Ignatenko A.M. Technologies for repairing of cathode unit of electron beam gun with the use of electron beam welding ..... 22

#### WELDING EQUIPMENT

Marynskyi G.S., Tkachenko V.A., Bysko V.O., Podpryatov S.E., Podpryatov S.S., Grabovskiy S.D., Tkachenko S.V. High-frequency equipment for live tissue welding (Review) ..... 39

#### PROTECTIVE COATINGS

Moltasov A.V., Voinaroych S.G., Dyman M.M., Kalyuzhnyi S.M., Burburska S.V. Methods to prevent the stress shielding effect in implant-body system (Review)..... 38

#### WELDING POLYMERS

Korab M.G., Yurzenko M.V., Demchenko V.L., Mamunya Ye.P. Modern models of formation of polymer welded joints materials (Review)..... 47

#### INFORMATION

The achievement of additive technologies for the reconstruction of Ukrainian of industry, science and engineering ...56

Successful holding of industrial exhibitions in India..... 57

Current patents of E.O. Paton Electric Welding Institute for inventions ..... 58

New books..... 66

In memory of A.H. Potapievskiy..... 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 Національної академії наук України  
Міжнародний науково-технічний та виробничий журнал  
E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine  
International Scientific-Technical and Production Journal

## Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

### Засновники

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

### Адреса

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

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

Рекомендовано до друку  
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну  
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

### Передплата 2023

Передплатний індекс 70031.  
12 випусків на рік (видається щомісячно).  
Друкована версія: 3360 грн. за річний комплект  
з урахуванням доставки рекомендованою банделером.  
Електронна версія: 3360 грн. за річний комплект  
(випуски журналу надсилаються електронною поштою  
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера  
передплатника надається доступ до архіву журналу).  
Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.  
Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково  
перевідаються англійською мовою в журналі  
«The Paton Welding Journal»:  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj)

За зміст рекламних матеріалів  
видавець відповідальності не несе.

### EDITORIAL BOARD

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

### Founders

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

### Address

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

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal

Certificate of state registration

of KV 4788 dated 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

### Subscription 2023

Subscription index 70031.

12 issues per year (issued monthly), back issues available.

\$384, subscriptions for the printed (hard copy) version,  
air postage and packaging included.

\$312, subscriptions for the electronic version  
(sending issues of Journal in pdf format  
or providing access to IP addresses).

Subscription is possible for previous issues for any year.

Articles from «Автоматичне Зварювання» (Automatic Welding)  
journal is republished selectively in English in  
«The Paton Welding Journal»:

[www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj)

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

Підписано до друку 02.02.2023.  
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7.9  
Друк ТОВ «ДА».  
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

# ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ З'ЄДНАНЬ РЕЙОК МАРКИ R260MN ПРИ КОНТАКТНО-СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

В.І. Швець, О.В. Дідковський, І.В. Зяхор, Є.В. Антіпін, Л.М. Капітанчук

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

Досліджено властивості та особливості мікроструктури з'єднань рейкової сталі марки R260MN з підвищеним вмістом марганцю, отриманих контактним зварюванням пульсуючим оплавленням. Показано утворення в з'єднанні мартенсит-аустенітних структур внаслідок неоднорідності розподілу аустенітстабілізуючого марганцю. Кількість і розміри ізольованих мартенсит-аустенітних структур незначна і критично не впливає на результати випробувань з'єднань. Контроль ліквідаційної неоднорідності марганцю досягається за допомогою удосконалення металургійного процесу. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 10.

*Ключові слова:* контактне-стикове зварювання, рейки марки R260MN, розподіл твердості, мартенсит-аустенітні структури, ліквідаційна неоднорідність

**Вступ.** Зростання швидкості та вантажопідйомності потягів потребує вдосконалення експлуатаційних характеристик рейок. Можливості термообробки перлітних рейкових сталей обмежені. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є вдосконалення хімічного складу рейкової сталі за допомогою зміни співвідношення базових елементів (вуглець, марганець, кремній) та додаткового легування. У перлітній рейковій сталі марки M76 вміст вуглецю передбачається в кількості 0,69...0,82 %, марганцю 0,75...1,05 %, кремнію 0,18...0,4 % (таблиця). Вуглець, марганець та кремній підвищують стійкість переохолодженого аустеніту. Перлітне перетворення відбувається в області нижчих температур з утворенням пластинчастих структур з високою дисперсністю і, відповідно, міцністю. Мікролегування ванадієм, титаном і ніобієм забезпечує дисперсійне зміцнення перліту з одночасним зменшенням міжпластинчастої відстані та подрібненням мікроструктури [1, 2]. У рейкових сталях марок E76Ф, K76Ф, M76Ф та E76Т, K76Т помітно підвищуються експлуатаційні характеристики. Відомі перлітні рейкові сталі марок M76ХСФ та E76ХСФ, у яких в якості легуючих елементів використано ванадій і хром. Легування хромом підвищує твердість рейок, що збільшує їх зносостійкість.

У ході робіт з удосконалення рейкових сталей розглянуто можливості збільшення вмісту вуглецю понад евтектоїдного (>0,82 %). Вміст вуглецю в таких рейках марки AREAL 136HE-370 виробництва японської корпорації Nippon Steel & Sumitomo metal group складає 0,99...1,0 %. У роботі [3] нами показано, що при контактному стиковому зварюванні оплавленням (КСЗО) рейок

завтектоїдного складу має місце перерозподіл вуглецю в мікроструктурі з'єднань. Розпад доевтектоїдної карбідної фази супроводжується утворенням включень вуглецю. Останнє викликає зниження вмісту вуглецю в матриці та формування структури з'єднання подібно до такої перлітних рейок доевтектоїдного складу. Необхідно відзначити, що на ділянці великого зерна в з'єднанні твердість порівняно з основним металом незначно знижується та становить  $HV$  3900 МПа. Причиною цього є відсутність доевтектоїдної карбідної фази на межах первинних аустенітних зерен.

Одним з напрямків поліпшення зносостійкості перлітних поверхнево гартованих рейок стало збільшення вмісту марганцю, що підвищує прожарювання. До таких відносяться рейки марки R260MN, верхня межа вмісту марганцю яких складає 1,34 мас. % (таблиця).

У ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено та успішно використовується технологія контактного стикового зварювання високоміцних рейок R260 та R350HT з використанням пульсуючого оплавлення, яка забезпечує отримання стабільних показників механічних властивостей на рівні основного металу. Відповідно до термодинамічних кривих розпаду аустеніту в термомеханічних умовах КСЗО названих рейкових сталей утворення мартенситу в з'єднаннях не відбувається [4]. Мікроструктурою з'єднань є перліт, який відрізняється на різних ділянках ЗТВ ступенем дисперсності. Властивості з'єднань відповідають вимогам європейських стандартів [5, 6].

Використовуючи попередні розробки після оптимізації режиму проведено зварювання партії рейок марки R260MN(60E1) виробництва ме-

Швець В.І. – <http://orcid.org/0000-0003-4653-7453>, Дідковський О.В. – <http://orcid.org/0000-0001-5268-5599>,

Зяхор І.В. – <http://orcid.org/0000-0001-7780-0688>, Антіпін Є.В. – <http://orcid.org/0000-0003-3297-5382>,

Капітанчук Л.М. – <http://orcid.org/0000-0002-8624-2590>

© В.І. Швець, О.В. Дідковський, І.В. Зяхор, Є.В. Антіпін, Л.М. Капітанчук, 2023

талургійної компанії ArcelorMittal. Дослідження зварних з'єднань на втому, статичний вигин, розподіл твердості проведено в центрі експертиз рейок SNCS (Франція) визнало, що параметри та результати випробувань відповідають вимогам європейського стандарту [7]. Водночас в мікроструктурі з'єднань деяких партій рейок виявлено незначну кількість структурних складових, твердість яких становить  $\sim 776\text{--}900\text{ HV }0,1$ , що не відповідає вимогам європейського стандарту.

Метою даної роботи було виявлення особливостей мікроструктурного стану зони термічного впливу з'єднань рейок марки R260MN(60E1).

**Методика та обладнання.** Розглянуто з'єднання рейок марки R260MN(60E1) з вмістом марганцю 1,45 мас. % (таблиця). З'єднання отримано на машині для контактного стикового зварювання K1000 з використанням пульсуючого оплавлення. Після оптимізації режиму рекомендовані параметри мають знаходитись у межах: час зварювання – 70...90 с, зварювальний струм – 360...390 А, припуск на оплавлення – 10...14 мм, величина осадки – 11...14 мм.

Макроструктуру з'єднань виявляли відповідно до вимог ГОСТ Р51685–2013 на повнопрофільному темплеті, вирізаному у поперечному напрямку. Травлення шліфованих зразків здійснювалось водним розчином хлорного заліза.

Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі NEOPHOT 32, оснащеному цифровим фотоапаратом. Мікроструктуру виявляли травленням попередньо полірованих зразків у 4 %-у спиртовому розчині  $\text{HNO}_3$ . Для аналізу мікроструктури та визначення хімічного складу структурних складових використовували ОЖЕ-мікрозонд JAMP 9500F фірми JEOL (Японія) та рентгенівський енергодисперсійний спектрометр JNCA Penta FET x3 фірми Oxford Instrument. Енергія первинного електронного пучка становила 10 keV при струмі 0,5 nA для методів PEM та PCMA. Перед дослідженнями поверхня зразків піддавалася очищенню безпосередньо в камері аналізу приладу шляхом травлення іонами аргону  $\text{Ar}^+$  з енергією 1 keV протягом 10 хв. Швидкість

травлення по контрольному зразку-свідку  $\text{SiO}_2$  становила 4 нм/хв. Вакуум у камері аналізу знаходився в межах  $5 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-5}$  Па.

Твердість за Віккерсом вимірювали на твердомірі NOVOTEST TC-GPB з навантаженням 292,4 Н (30 кг). Розподіл твердості у з'єднанні досліджували на відстані 5 мм від поверхні катання рейки.

**Результати досліджень та обговорення.** Металографічні дослідження макроструктури з'єднання показали (рис. 1), що зона термічного впливу є симетричною щодо лінії зварного шва. Ширина її склала 30...40 мм і знаходиться в межах, що допускаються європейським стандартом [7] – 20...45 мм. Макроструктура зони термічного впливу є типовою для подібних з'єднань перлітних рейкових сталей і складається із зони шва, до якої примикає зона великого зерна, потім розташовані зони дрібного зерна, неповної перекристалізації та відпуску. Дефекти у структурі відсутні.

Відповідно до кривої розподілу (рис. 2), твердість у з'єднанні зростає в зоні великого зерна та знижується в зоні відпуску. Рівень відхилення

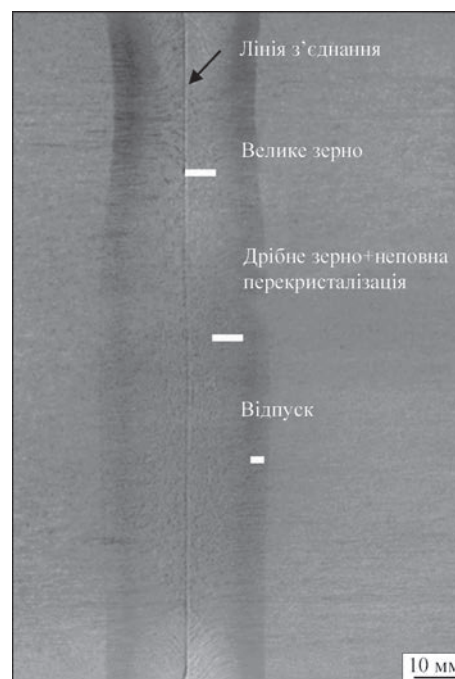


Рис. 1. Макроструктура з'єднання рейок марки R260MN

#### Хімічний склад рейкових сталей (мас. %)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Al	Ni	Ti	V
M76	0,71...0,82	0,75...1,05	0,25...0,45	$\leq 0,035$	$\leq 0,04$					
AREAL 136 HE-X (NipponSteel, Японія)	0,99...1,00	0,69...0,71	0,50...0,52	$\leq 0,030$		0,21...0,22	$\leq 0,005$			0,04
R260	0,60...0,82	0,65...1,25	0,13...0,60	$< 0,03$	$< 0,03$	$< 0,15$	$< 0,004$	$< 0,1$	$< 0,025$	$< 0,03$
R260MN нормативи виробника ArcelorMittal, Іспанія	0,66	1,34	0,27	0,018	0,008	0,03	0,001	0,22	0,22	0,04
R260MN(60E1) рельс, що досліджувався	0,75	1,45	0,28	0,017		0,35		0,03		



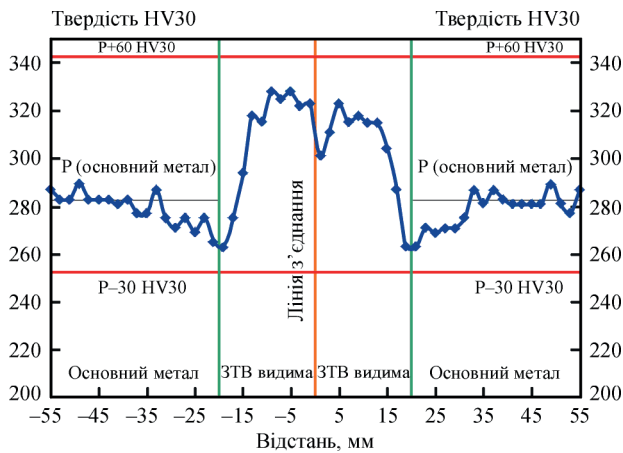


Рис. 2. Розподіл твердості у з'єднанні рейок марки R260MN від твердості основного металу відповідає вимогам європейського стандарту: максимальна твердість не повинна перевищувати твердість основного металу на 60 *HV* 30, мінімальна не повинна бути нижчою за твердість основного металу на 30 *HV* 30 [7]. Дослідження мікроструктури з'єднання показало, що основний метал є сорбітом загартування з деякою кількістю доєвтектоїдного фериту на межах первинних аустенітних зерен (рис. 3). Забрудненість неметалевими включеннями є незначною та відповідає балу № 3-4 згідно з ГОСТ 1778-70. Неметалеві включення представлені сульфідами глобулярної або витягнутої вздовж напрямку прокату формою з краплями оксидів та карбонітридів. Трапляються поодинокі глобулярні включення оксидів.

У зоні термічного впливу мікроструктура переважно являє собою пластинчастий перліт різного ступеня дисперсності (рис. 4). Розмір міжпластинчастої відстані в перліті впливає на показники твердості: зменшення міжпластинчастої відстані веде до збільшення твердості. Виняток становить зона відпуску. Мікроструктура зони відпуску є зернистим сорбітом, що утворився в результаті коагуляції карбідних пластин. По лінії з'єднання в смузі завширшки ~200 мкм зерна первинного аустеніту окантовані виділеннями доєвтектоїдного фериту. Розмір первинних аустенітних зерен відповідає балу 3-4 за шкалою ASTM.

Характерною особливістю мікроструктури з'єднання є формування в зоні термічного впливу ділянок світлого кольору, що добре виділяються на тлі перліту. Розмір їх варіюється від десятків до сотень мікрон. Ці структурні складові спостерігаються вздовж смуг прокату (рис. 5, б) та у вигляді об'ємних утворень довільної форми (рис. 5, в) на відстані 1...5 мм від лінії з'єднання. Дослідження на електронному мікроскопі виявили подібні структурні складові також на межах первинних аустенітних зерен (рис. 5, з). Наявність голчастих і лінзоподібних включень в межах цих структур з твердістю 901-928 *HV* 0,1 і 762-776 *HV* 0,1 відповідно дало підставу стверджувати, що ці структурні складові являють собою залишковий аустеніт з продуктами розпаду, зокрема голчастим мартенситом, так звані мартенсит-аустенітні структури.

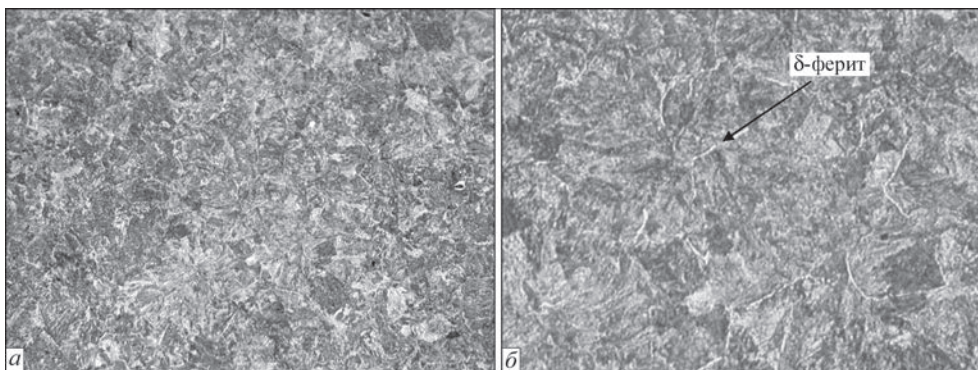


Рис. 3. Мікроструктура основного металу рейки марки R260MN(60E1): а –  $\times 100$ ; б –  $\times 1000$

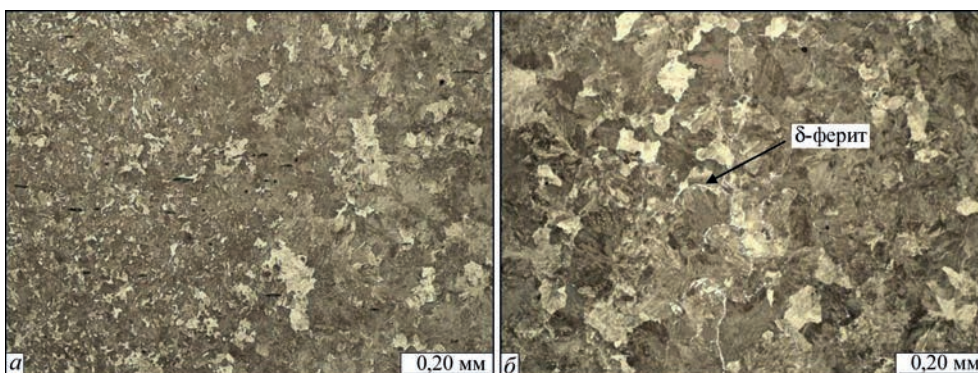


Рис. 4. Мікроструктура з'єднання рейок марки R260MN: а – перехідна зона основний метал-ЗТВ; б – лінія з'єднання,  $\times 100$



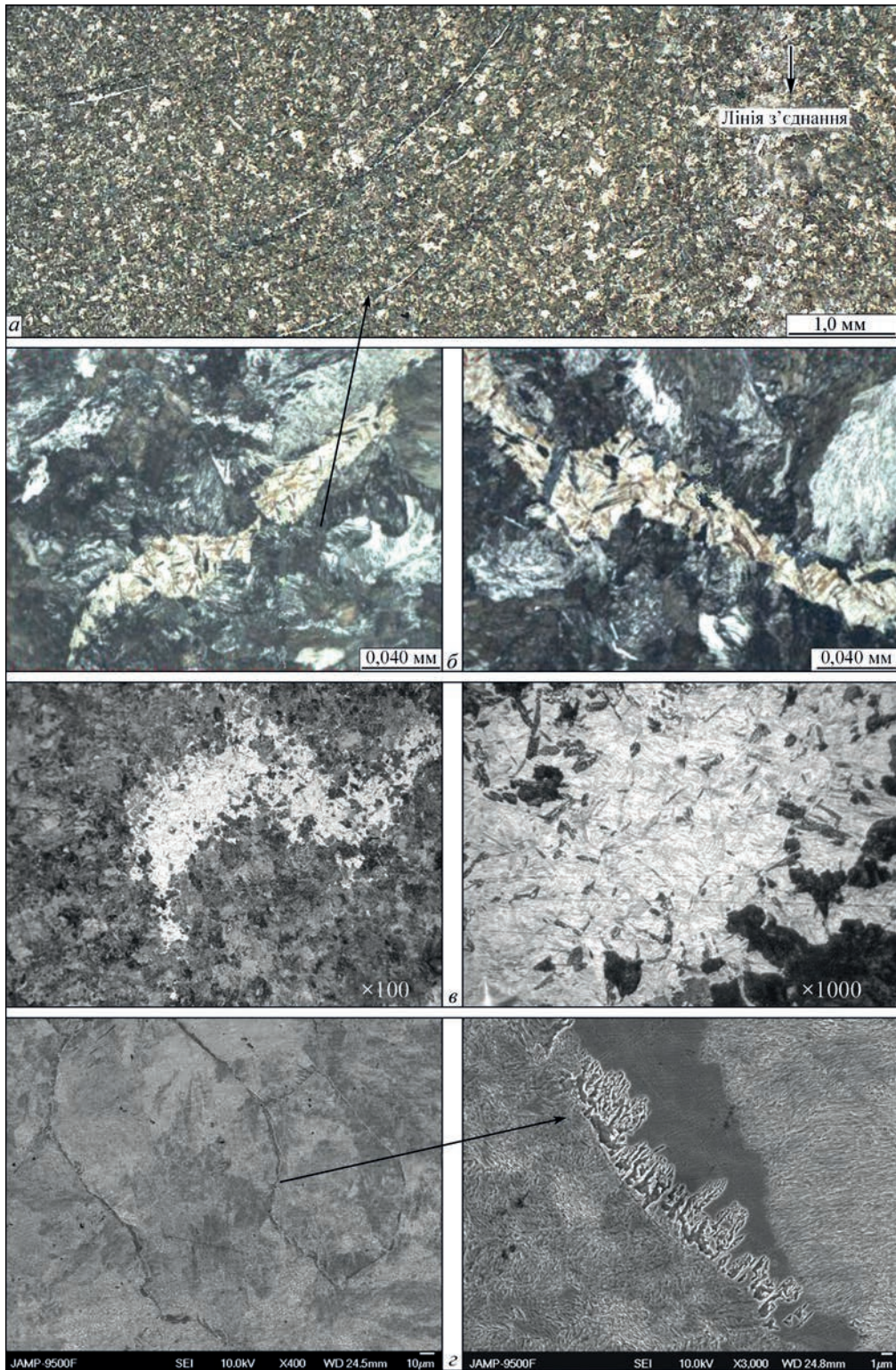


Рис. 5. Мартенсит-аустенітна структура в з'єднанні рейок марки R260MN: *a* – загальний вигляд; *б* – смуги прокату; *в* – об'ємні утворення; *г* – межі первинних аустенітних зерен

При дослідженні мікроструктури на растровому електронному мікроскопі розглянуто ділянку, представлену на рис. 6, *a*. Встановлено, що лінійно-подібні включення в залишковому аустеніті є бейнітом (рис. 7). Бейніт утворюється як в об'ємі залишкового аустеніту (рис. 7, *a*), так і на його межі з матрицею (рис. 7, *б*). Особливості морфології бейніту та розподіл вуглецю між феритом, кар-

бідами та сусіднім залишковим аустенітом представлені на рис. 7, *б*. Аналіз параметрів структури показав, що міжпластинчаста відстань у перліті матриці змінюється в межах 0,102...0,123 мкм (рис. 6, *в*). Це співмірно з параметрами структури рядових з'єднань рейок – 0,8...0,12 мкм [8]. Необхідно відзначити, що в мікроструктурі зустрічаються ділянки з вищим ступенем дисперсності



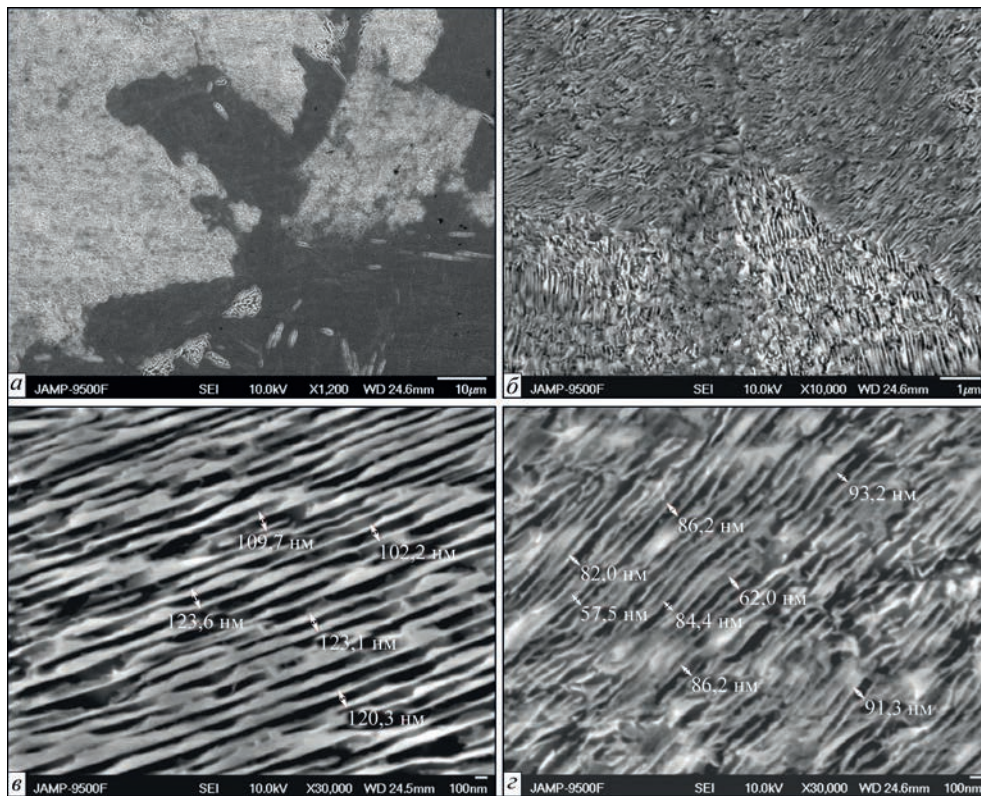


Рис. 6. Перліт в мікроструктурі з'єднань рейок марки R260MN: *a* – ділянка аналізу; *б* – матриця; *в, г* – результати вимірювання міжпластинчастої відстані

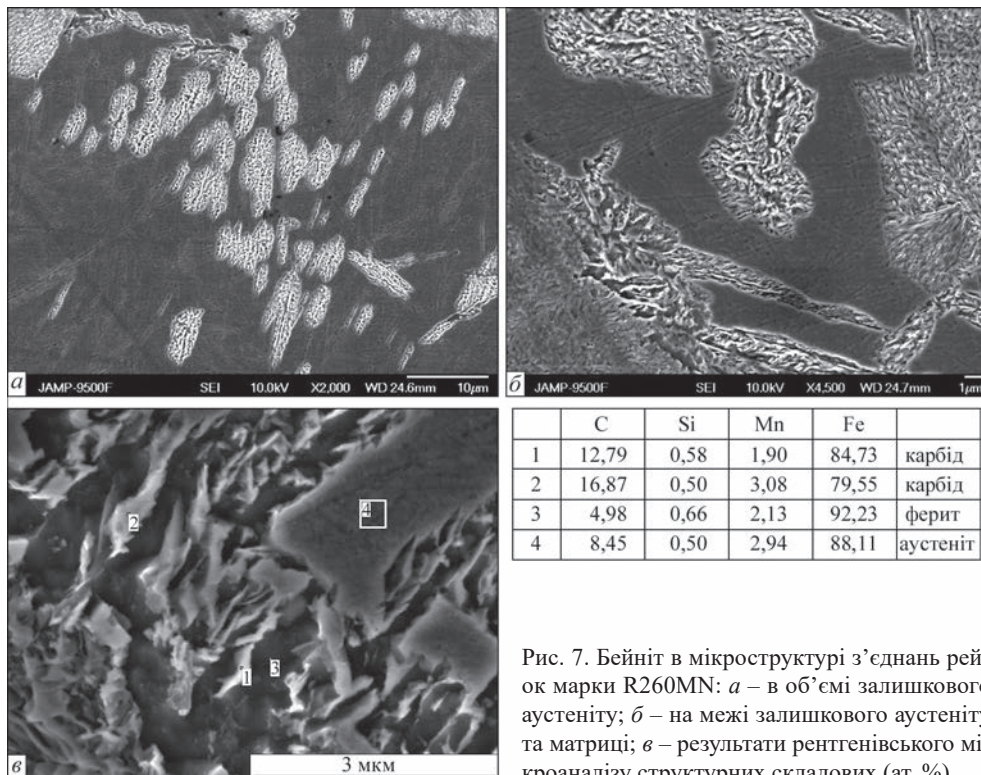


Рис. 7. Бейніт в мікроструктурі з'єднань рейок марки R260MN: *a* – в об'ємі залишкового аустеніту; *б* – на межі залишкового аустеніту та матриці; *в* – результати рентгенівського мікроаналізу структурних складових (ат. %)

перліту, зокрема на межі з залишковим аустенітом – 0,057...0,093 мкм (рис. 6, *г*).

Відомо, що за інших рівних умов на характер розпаду аустеніту при охолодженні впливає хімічний склад [9]. Відсутність системності утворення ділянок залишкового аустеніту дає підстави припустити хімічну неоднорідність металу з'єднання.

При порівняльному аналізі хімічного складу матриці та залишкового аустеніту відзначено підвищений вміст в останньому марганцю: 2,63...2,34 та 1,62...0,76 ат. % (рис. 8, *a*) та 2,25...2,22 та 1,42...1,49 ат. % (рис. 8, *б*) відповідно. Це узгоджується з тим, що марганець є аустенітостабілізуючим елементом. Неоднорідність розподілу



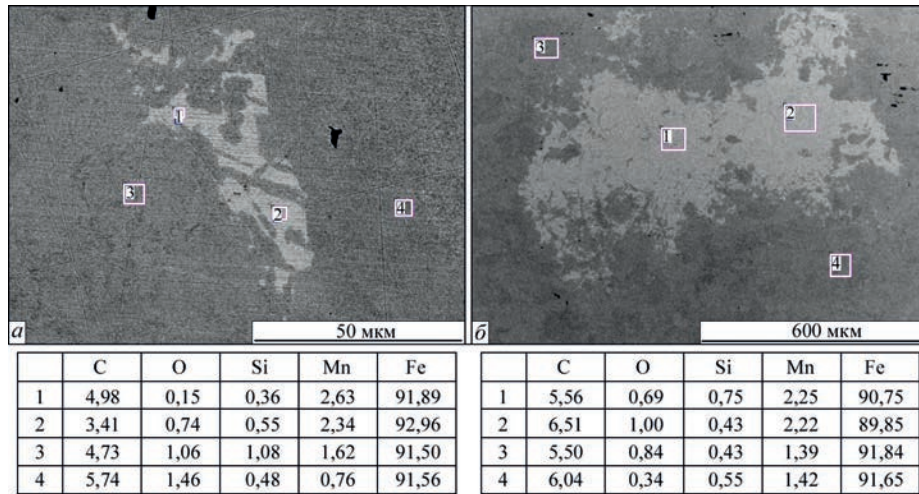


Рис. 8. Результати рентгенівського мікроаналізу хімічної неоднорідності на ділянці з мартенсит-аустенітними структурами (ат. %)

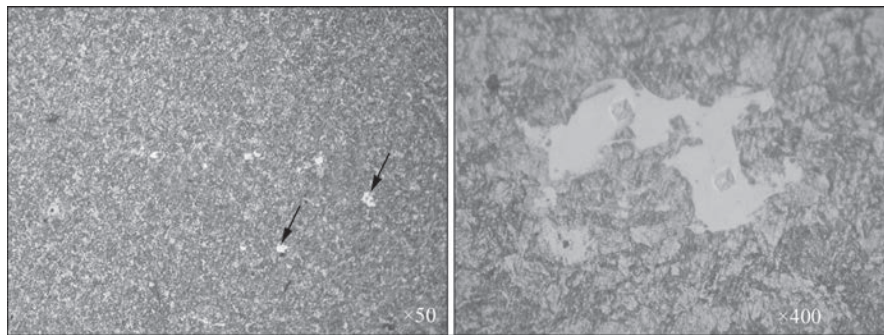


Рис. 9. Мікроструктура основного металу після термообробки по режиму:  $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , витримка 4 хв, охолодження в повітрі

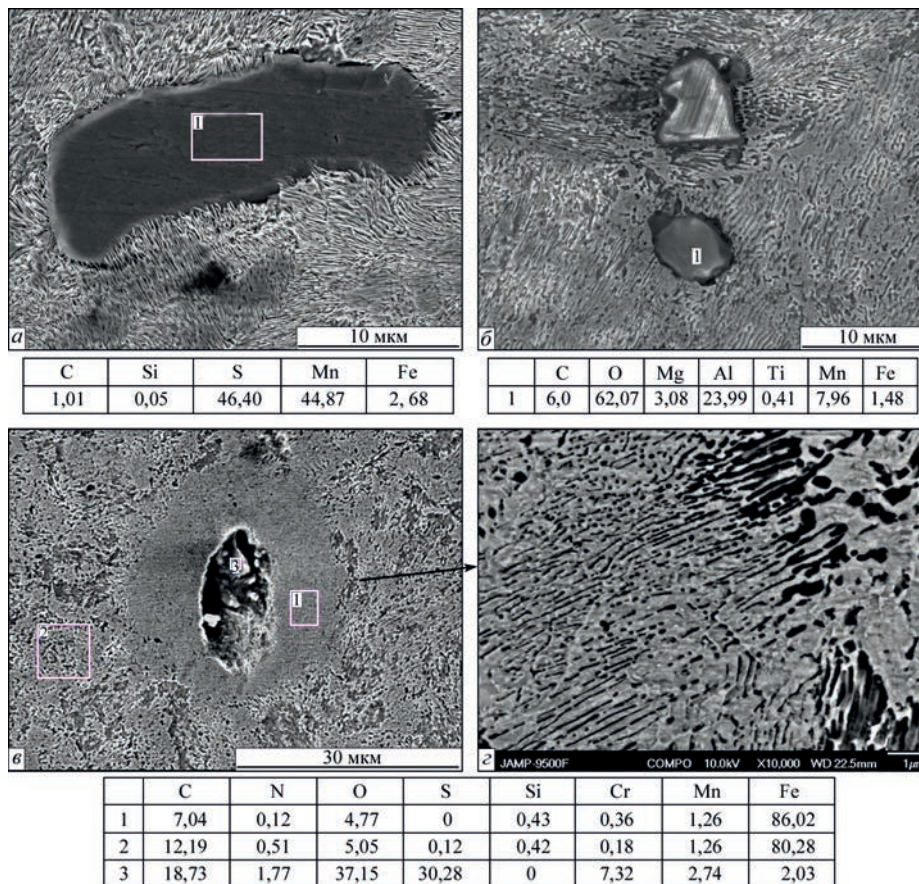


Рис. 10. Неметалеві включення в сталі марки R260MN та результати рентгенівського мікроаналізу хімічного складу структур (ат. %): а – сульфід марганцю; б – комплексні оксиди; в – комплексні неметалеві включення з вмістом хрому; г – перехідна зона



виникає у зв'язку зі схильністю марганцю до дендритної та зональної ліквідації при кристалізації виливків сталі [10]. Вихідна неоднорідність певною мірою зберігається після прокатки та термічної обробки, хоча й перетворюється. У металі вона спостерігається поряд з окремими об'ємами, збагачені марганцем смуги прокату.

Вивчено вплив термообробки на можливу трансформацію мартенсит-аустенітних структур. Використані наступні режими термообробки зразків:  $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 4\text{ хв}$ ;  $T = 920\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 4\text{ хв}$ ; охолодження в повітрі. Порівняльний аналіз мікроструктур показав, що нормалізація не усуває мартенсит-аустенітні структури. Більш того, мартенсит-аустенітні структури проявились в основному металі (рис. 9). Очевидно, наведені режими не впливають на неоднорідність розподілу марганцю. Усунення неоднорідності потребує гомогенізаційного відпуску, що мало ймовірно в умовах виробництва рейок.

Відомо [11], що ступінь ліквідаційної неоднорідності переважно залежить від швидкості охолодження виливків при виробництві сталі. Ймовірно для усунення неоднорідного розподілу марганцю необхідно контролювання та удосконалення металургійного процесу.

Представляє інтерес неоднорідність мікроструктури з'єднання, що зумовлена неметалеви ми включеннями. Так, якщо сульфіди марганцю та оксиди не впливають на структуроутворення (рис. 10, а, б), то навколо комплексних неметалевих включень, до складу яких входять оксікарбіди хрому, спостерігається ареал зі зниженим вмістом вуглецю (рис. 10, в). Лінійний розмір ареалу відповідає розміру неметалевих включень і становить  $\sim 100\text{ мкм}$ . Зниження вмісту вуглецю зміщує перетворення аустеніту в область вищих температур. Це знаходить свій відбиток у мікроструктурі (рис. 10, г).

## Висновки

1. Формування з'єднань рейок марки R260MN з підвищеним порівняно з рейками марки R260 вмістом марганцю при КСЗО є задовільним і подібно такому у типових перлітних рейках.

2. У з'єднаннях рейок марки R260MN можливе утворення мартенсит-аустенітних структур вздовж смуг прокату, по межах первинних аустенітних зерен, а також у вигляді об'ємних утворень довільної форми на відстані 1...5 мм від лінії з'єднання. Поява мартенсит-аустенітних структур зумовлена неоднорідністю розподілу в металі рейок аустенітстабілізуючого марганцю, схильного до дендритної та зональної ліквідації при кристалізації виливків сталі. Наявність мартенсит-аустенітних структурних складових не

відповідає вимогам європейського стандарту до мікроструктури.

3. Нормалізація не усуває неоднорідності розподілу марганцю в з'єднаннях рейок марки R260MN. Запобігання неоднорідності розподілу марганцю і утворенню мартенсит-аустенітних структурних складових у мікроструктурі потребує контролю та вдосконалення металургійного процесу при виробництві сталі.

## Список літератури

- Шапошников Н.Г., Конов А.А., Могутнов Б.М. и др. (2004) Условия эффективного воздействия нитридных и карбонитридных фаз на измельчение структуры конструкционных перлитных сталей. *Сталь*, 7, 84–87.
- Шипицын С.Я. (2014) Высокоуглеродистые стали с дисперсионным нитридным упрочнением для транспортного и других видов машиностроения. *Металл и литье Украины*, 9(256), 16–21.
- Shvets, V.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Ye.V. et al. (2022) Features of microstructure of butt joints of hypereutectoid Areal-136HE-X rail steel in flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, 3, 34–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/trwj2022.03.04>
- Попов А.А., Попова А.Е. (1961) *Изотермические и термомокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита*. Москва, МАШГИЗ.
- Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Ye.V. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails. *Mining–Informatics. Automation and Electrical Engineering*, 4(528), 40–48.
- Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Ye.V., Shvets, V.I., Wojtas, P., Kozłowski, A. (2017) Real-time operational control in information management system for flash-butt welding rails. *Mining–Informatics. Automation and Electrical Engineering*, 1(529), 36–42. DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.35>
- EN 14587-2007 Flash butt welding of rails. Part 1 New R220.
- Шур Е.А. (2012) *Повреждения рельсов*. Москва, Интекст.
- Садовский В.Д., Фокина Е.А. (1986) *Остаточный аустенит в закаленной стали*. Москва, Наука.
- Голиков И.Н., Масленков С.Б. (1977) *Дендритная ликвация в сталях и сплавах*. Москва, Металлургия.
- Бабаченко О.І., Дьоміна К.Г., Кононенко Г.А. та ін. (2021) Вплив швидкості охолодження безперервнолитої заготовки, що твердне, на параметри дендритної структури вуглецевої сталі з 0,54 % С. *Металлофіз. новітні технології*, 43, 11, 1537–1551 (Україна). DOI: <https://10.15407/mfint.43.11.1537>

## References

- Shaposhnikov, N.G., Konov, A.A., Mogutnov, B.M. et al. (2004) Conditions of effective actions of nitride and carbonitride phases on structure refinement of structural pearlitic steels. *Stal*, 7, 84–87 [in Russian].
- Shipitsyn, S.Ya. (2014) High-carbon steels with dispersion nitride hardening for transport and other types of mechanical engineering. *Metall i Litio Ukrainy*, 9(256), 16–21 [in Russian].
- Shvets, V.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Ye.V. et al. (2022) Features of microstructure of butt joints of hypereutectoid Areal-136HE-X rail steel in flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, 3, 34–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/trwj2022.03.04>

4. Popov, A.A., Popova, A.E. (1961) *Isothermal and thermokinetic diagrams of overcooled austenite decay*. Moscow, Mashgiz [in Russian].
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Ye.V. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails. Mining–Informatics. *Automation and Electrical Engineering*, 4(528), 40–48.
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Ye.V., Shvets, V.I., Wojtas, P., Kozłowski, A. (2017) Real-time operational control in information management system for flash-butt welding rails. Mining–Informatics. *Automation and Electrical Engineering*, 1(529), 36–42. DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.35>
7. EN 14587-2007 Flash butt welding of rails. Pt 1 New R220.
8. Shur, E.A. (2012) *Damages of rails*. Moscow, Intekst [in Russian].
9. Sadovsky, V.D., Fokina, E.A. (1986) *Residual austenite in hardened steel*. Moscow, Nauka [in Russian].
10. Golikov, I.N., Maslenkov, S.B. (1977) *Dendritic segregation in steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Babachenko, O.O., Dyomina, K.G., Kononenko, G.A. et al. (2021) Influence of cooling rate of continuous casting billet being solidified on parameters of dendritic structure of carbon steel with 0.54% C. *Metalofiz. Novitni Tehnol.*, 43(11), 1537–1551 [in Ukrainian]. DOI: <https://10.15407/mfint.43.11.1537>

## STUDY OF THE STRUCTURE OF JOINTS OF RAILS OF R260MN GRADE IN FLASH-BUTT WELDING

V.I. Shvets, O.V. Didkovsky, I.V. Zyakhor, E.V. Antipin, L.M. Kapitanchuk

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

The properties and features of the microstructure of joints of the rail steel of R260MN grade with an elevated content of manganese produced by flash-butt welding with pulsating flashing were investigated. The formation of martensite-austenitic structures due to non-uniform distribution of austenitic stabilizing manganese is shown. The number and sizes of isolated martensite-austenitic structures is insignificant and does not critically affect the test results. The control of the segregation heterogeneity of manganese is achieved by improving the metallurgical process. 11 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

*Keywords:* flash-butt welding, rails of R260MN grade, hardness distribution, martensite-austenitic structures, segregation heterogeneity

Надійшла до редакції 27.12.2022

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —  
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN  
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN  
No. 1 IN THE WORLD

MESSE ESSEN

DVS GERMAN WELDING SOCIETY



# ВПЛИВ ЧАСТОТИ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 09Г2С

О.Д. Размишляєв, С.Ю. Максимов, О.М. Берднікова, О.О. Прилипко, О.С. Кушнарєва,  
Т.О. Алексеєнко

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

Досліджено особливості структури металу зварних з'єднань сталі 09Г2С при зварюванні із застосуванням поздовжнього зовнішнього електромагнітного поля. Вивчено вплив частоти ( $f = 2; 12; 50$  Гц) поля на фазовий склад, мікроструктуру та мікротвердість металу зварних з'єднань. Встановлено, що в дослідженому діапазоні частот відбуваються значні зміни структурних параметрів в металі швів та на ділянках зони термічного впливу (ЗТВ). Більшою мірою дія частоти електромагнітного впливу при зварюванні низьколегованої сталі спостерігається у металі швів та ЗТВ у ділянці перегріву (великого зерна). Застосування  $f = 12$  Гц забезпечило рівномірний рівень мікротвердості як у металі шва, так і по ділянках ЗТВ та подрібнення зеренної структури металу у ділянці перегріву (І ЗТВ) зварного з'єднання сталі 09Г2С. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 3.

*Ключові слова:* сталь 09Г2С, зварні з'єднання, зовнішній електромагнітний вплив, поздовжнє магнітне поле, частота, зона термічного впливу, фазовий склад, параметри мікроструктури, мікротвердість

Для керування процесами плавлення електродного і основного металів, а також процесом кристалізації металу зварювальної ванни перспективним є застосування зовнішніх магнітних полів, що впливають на краплю, дугу та рідкометалеву ванну [1, 2]. При дуговому зварюванні застосовують поздовжні магнітні поля (ПДМП) і поперечні магнітні поля (ПОМП). У перших вектор індукції паралельний, у других – перпендикулярний до осі електрода та дуги. Магнітне керування має переваги в порівнянні з механічними способами, оскільки воно здійснюється без безпосереднього контакту пристроїв, що керують, із зоною наплавлення (зварювання) [3].

Застосування ПДМП і ПОМП при дуговому наплавленні і зварюванні дозволяє інтенсифікувати процес розплавлення електрода, регулювати ефективність проплавлення основного металу, впливати на процес кристалізації металу шва [4, 5]. Аналізу фізики процесу проплавлення металу під зовнішнім електромагнітним впливом (ЗЕВ), розподілу тиску по радіусу дуги, руху електродної краплі, потоків рідкого металу у зварювальній ванні, кристалізації металу, а також механізмів подрібнення структури металу швів присвячено багато досліджень, у тому числі кластерні теорії кристалізації рідкого металу [4, 6–8]. Саме подрібнення структури металу призводить до підвищення рівня зміцнення металу (згідно залежності Холла-Петча [9]), а також буде забезпечувати його тріщиностійкість [4, 10, 11]. Звісно, що структурний стан, який формується у металі зварних з'єднань під впливом термодеомаційних умов зварювання, впливає на їх фізико-механічні властивості.

Як відомо, частота струму істотно впливає на характер силової дії електромагнітного поля на рідкий метал [8]. Із зменшення частоти, з одного боку, по-

гіршується електромагнітна взаємодія індуктора з розплавом, з іншого – розширюється зона дії об'ємних електромагнітних сил у рідкому металі.

Якщо змінювати полярність підключення обмоток з певною частотою, то і напрямок потоків розплавленого металу також зміниться. Такий рух рідкої ванни в реальному процесі дугового зварювання (наплавлення) сприяє подрібненню зерен металу в процесі його кристалізації. При взаємодії вздовж осі  $OX$  з компонентом густини струму в металі ванни компонента індукції  $B_x$  ПОМП створює електромагнітну силу, що спрямовує потік рідкого металу вздовж осі  $OY$ . Додатково виникає вертикальна компонента електромагнітної сили ( $F_z$ ) від взаємодії густини струму  $j_y$  у бокових кромках ванни з компонентом індукції  $B_x$ . При зміні полярності відбувається перемішування рідкого металу поперек осі ванни [7].

Вплив знакозмінного ПОМП призводить до розширення наплавлених валиків [12, 13]. При частоті  $f = 50$  Гц розширення валика відбувалося пропорційно до індукції. Але слід враховувати, що змінне ПОМП частотою до 1 Гц дає хвилясте поперечне переміщення осі валика, і для усунення цього недоліку необхідно використовувати частоту ПОМП від 2 Гц і вище.

У роботі [14] було вивчено, як при дуговому зварюванні дія знакозмінних магнітних полів з невеликими частотами впливає на мікротвердість, параметри мікроструктури металу зварних з'єднань сталі 09Г2С та розміри зони термічного впливу (ЗТВ). Проте залишилося невивченим вплив частоти зовнішнього електромагнітного поля на структуру зварних з'єднань, яка формується у металі зварних швів та ЗТВ.

Максимов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>, Берднікова О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>, Прилипко О.О. – <https://orcid.org/0000-0001-5244-5624>, Кушнарєва О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795>, Алексеєнко Т.О. – <https://orcid.org/0000-0001-8492-753X>

© О.Д. Размишляєв, С.Ю. Максимов, О.М. Берднікова, О.О. Прилипко, О.С. Кушнарєва, Т.О. Алексеєнко, 2023

Тому метою даної роботи було встановлення закономірностей впливу частоти зовнішнього електромагнітного поля, а саме ПДМП на структурно-фазовий склад, мікротвердість та мікроструктуру зварних з'єднань конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С.

**Матеріал та методики.** Для створення ПДМП використовували методику, описану в роботі [9]. У результаті зварювання конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С (завтовшки 4 мм) присадковим дротом Св-08А (діаметром 3 мм) (флюс АН-348) було отримано зварні з'єднання з застосуванням ПДМП на режимах зварювання: струм  $I = 360$  А; напруга на дузі  $U = 30...32$  В; швидкість зварювання  $v = 30$  м/год; зворотна полярність; на флюсо-мідній підкладці. Тип з'єднання С4 (ГОСТ 8713-78). Магнітна індукція в зоні зварювальної ванни становила  $20...25$  мТл. Було отримано два варіанта зварних з'єднань при різній частоті:  $f = 12$  та  $f = 50$  Гц. Результати експериментальних досліджень мікроструктури зварних з'єднань, що отримано із застосуванням ПДМП при вказаних частотах, подальше порівнювали з експериментальними даними, які отримано при  $f = 2$  Гц [14].

Дослідження мікроструктури проводили методами світлової мікроскопії (мікроскопи Neophot-32 і Versamet-2, Японія). Твердість за Віккерсом вимірювали на твердомірі М-400 (фірми Leco, США) при навантаженні 0,1 кг. Вивчали морфологію фериту (Ф) та перліту (П), розміри зерен ( $D_3$ ), ширину кристалітів ( $h_{кр}$ ), товщину феритних прошарків ( $h_{пр}$ )

та мікротвердість (HV). У зварних з'єднаннях було досліджено основний метал (ОМ), метал швів, лінію сплавлення (ЛС), зону термічного впливу (ЗТВ) по ділянках: I – перегріву (великого зерна); II – нормалізації (повної перекристалізації); III – неповної перекристалізації; IV – рекристалізації.

**Результати та їх обговорення.** Структура основного металу сталі 09Г2С феритно-перлітна при  $D_3(Ф) = 10...20$  мкм,  $D_3(П) = 40...80$  мкм та  $HV = 1650...1760$  (рис. 1, а). Структура металу зварних швів також феритно-перлітна (Ф-П), рис. 1, б–г. Ширина кристалітів П-складової при  $f = 2$  та  $f = 12$  Гц практично однакова (рис. 1, в, табл. 1). Але при  $f = 50$  Гц  $h_{кр}(П)$  збільшується в середньому на 48 % (рис. 1, г) із зменшенням мікротвердості на 10 % (у порівнянні з режимом  $f = 2$  Гц) та на 17 % (у порівнянні з режимом  $f = 12$  Гц, табл. 1). Ф-складова дрібніша з приблизно однаковими розмірами для всіх режимів та меншою мікротвердістю, ніж перлітна. Збільшення ширини кристалітів при підвищенні  $f$  корегує з даними роботи [14]. Але при  $f = 50$  структура дрібніша в середньому на 17 % у порівнянні з режимом без застосування ЗЕВ [14].

Звісно, що збільшення ширини кристалітів відбувається на стадії кристалізації. Якщо вісь сусіднього дендрита не співпадає з направленням теплового потоку, то він росте швидше. При цьому скрита теплота плавлення, яка виділяється у навколишню рідку ванну перед ростучими дендритами зменшує величину переохолодження та буде спри-

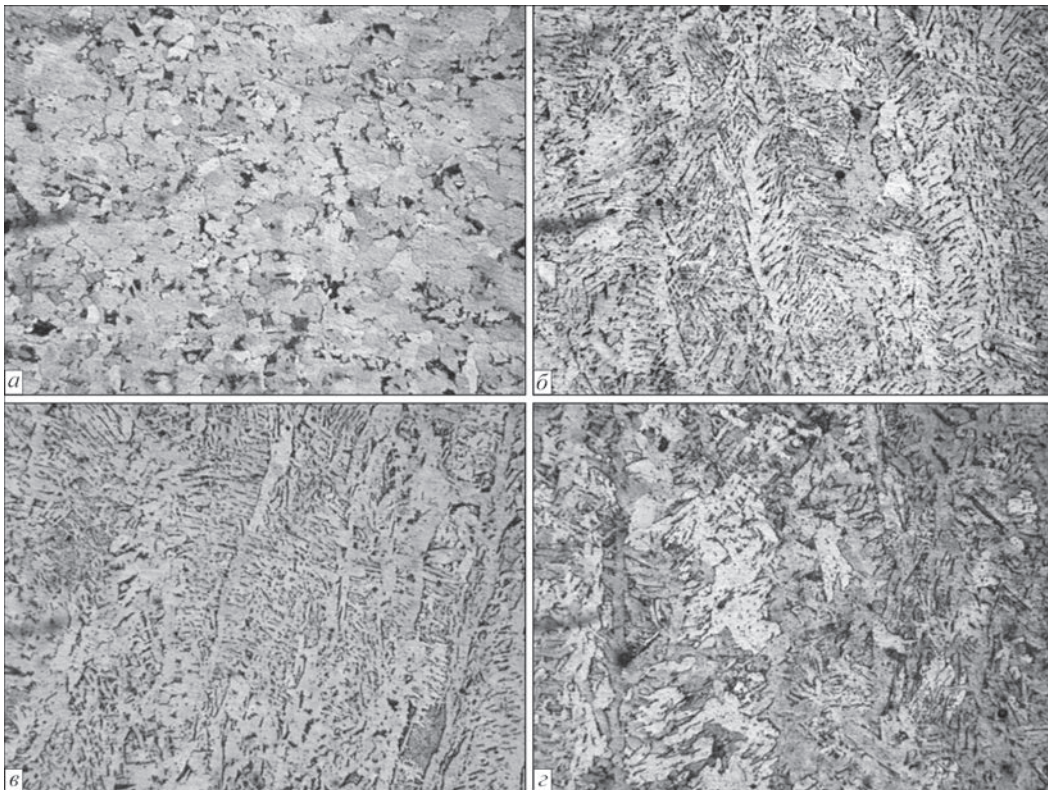


Рис. 1. Мікроструктура ( $\times 250$ ) основного металу (а) сталі 09Г2С та зварних швів (б–г), що отримані при різній частоті: б –  $f = 2$  Гц; в – 12; г – 50



Таблиця 1. Ширина кристалітів ( $h_{кр}$ , мкм) та мікротвердість ( $HV$ , МПа) металу швів зварних з'єднань при різній частоті ( $f$ ) ПДМП

Зона	$h_{кр}(\Phi)$	$h_{кр}(\Pi)$	$HV(\Phi)$	$HV(\Pi)$
	$f = 2$ Гц			
Шов	40...100	100...160	1760...1930	1990...2080
ЛС	20...40	60...140	1680...1990	1990...2280
$f = 12$ Гц				
Шов	20...100	80...160	1760...1930	2210
ЛС	20...60	60...140	1860	2060...2280
$f = 50$ Гц				
Шов	20...100	100...300	1650...1760	1810...1870
ЛС	50...100	60...200	1560...1700	1870

яти зменшенню росту сусідніх [15]. Таким чином має місце повільне охолодження металу.

У всіх випадках поблизу лінії сплавлення (ЛС) у порівнянні з металом шва ширина кристалітів зменшується (рис. 2, а, табл. 1), що пов'язано з більш інтенсивним охолодженням металу у цій зоні. У зразку, що отримано при  $f = 2$  Гц біля ЛС спостерігається незначне підвищення  $HV$  (на 5 %, табл. 1). При  $f = 50$  Гц у цій зоні середня  $HV$  не змінюється, але найбільш рівномірний рівень  $HV$  при переході від металу шва до ЛС спостерігається у зварному з'єднанні, що отримано із застосуванням  $f = 12$  Гц. Слід зазначити, що у всіх зварних з'єднаннях у зоні лінії сплавлення, тобто при переході від металу шва у І ЗТВ утворюються одиничні холодні тріщини.

Дослідженнями ЗТВ зразків із застосуванням ПДМП при різній частоті встановлено, що у І ЗТВ зразків на всіх режимах формується П-структу-

ра з прошарками фериту (рис. 2, б). У І ЗТВ зразків при  $f = 12$  та 50 Гц у порівнянні зі зразком, що отримано при  $f = 2$  Гц, П-структура подрібнюється (табл. 2). Максимальний розмір зерна та товщина феритних прошарків зменшуються, відповідно, на 17 та 29 %. При цьому незначно знижується мікротвердість – у середньому на 5 %. У II–IV ЗТВ на всіх режимах структура подрібнюється при подальшому рівномірному зменшенні  $HV$  (рис. 2, в–д).

Дослідженнями металу ЗТВ також встановлено, що при ПДМП частота зовнішнього електромагнітного поля має вплив на розміри ділянок ЗТВ (табл. 2). У досліджуваних зварних з'єднаннях при  $f = 12$  та  $f = 50$  Гц у порівнянні зі зварним з'єднанням, що отримано при  $f = 2$  Гц середня ширина ( $\delta$ ) І ЗТВ збільшується на 25 та 8 %. Це пов'язано з більш інтенсивним рухом рідкого металу у зварювальній ванні при збільшенні  $f$  та, відповідно з термомеханічними умовами структуроутворення у металі ЗТВ.

Збільшення параметрів І ЗТВ, а саме ділянки перегріву може відбуватися за рахунок зміни умов процесу плавлення та кристалізації металу, а саме – підвищення швидкості нагріву рідкого металу у зварювальній ванні, а також температури його нагріву під дією імпульсів струму. Відповідно це має вплив на збільшення розміру ділянки перегріву (І ЗТВ) при збільшенні параметра  $f$ . При цьому температурний градієнт, що виникає, сприяє збільшенню ступеня переохолодження та швидкості кристалізації металу ділянки перегріву (І ЗТВ). Це у свою чергу призводить до подрібнення зерен-

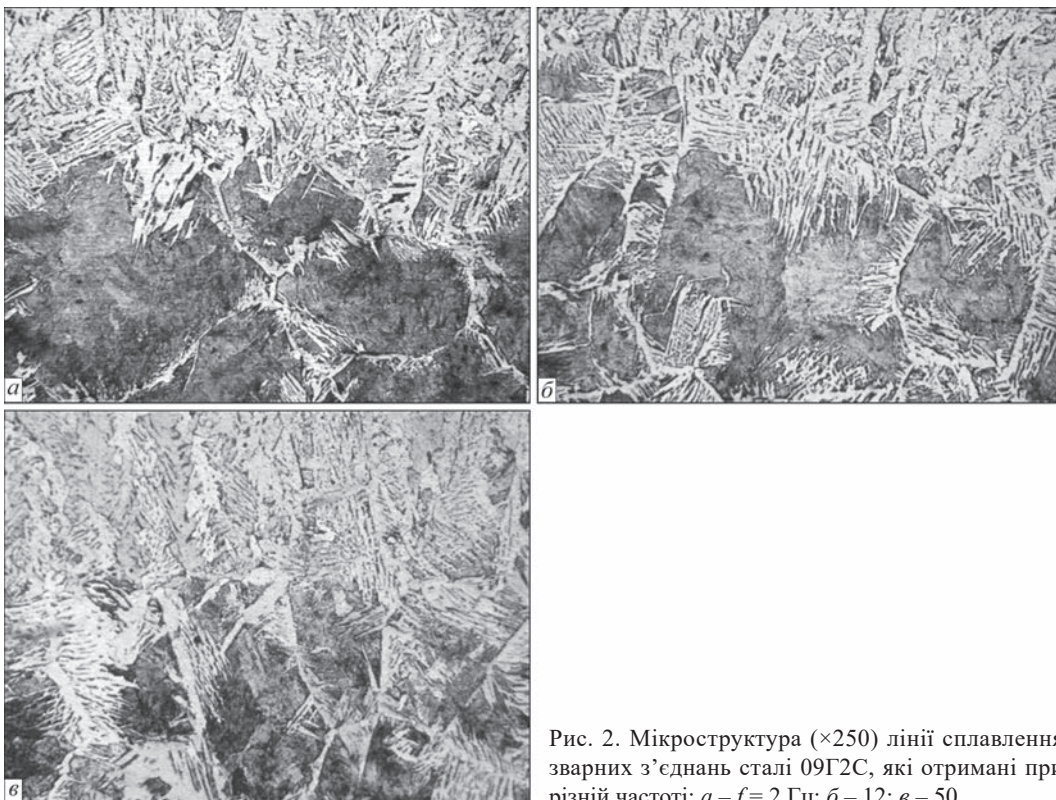
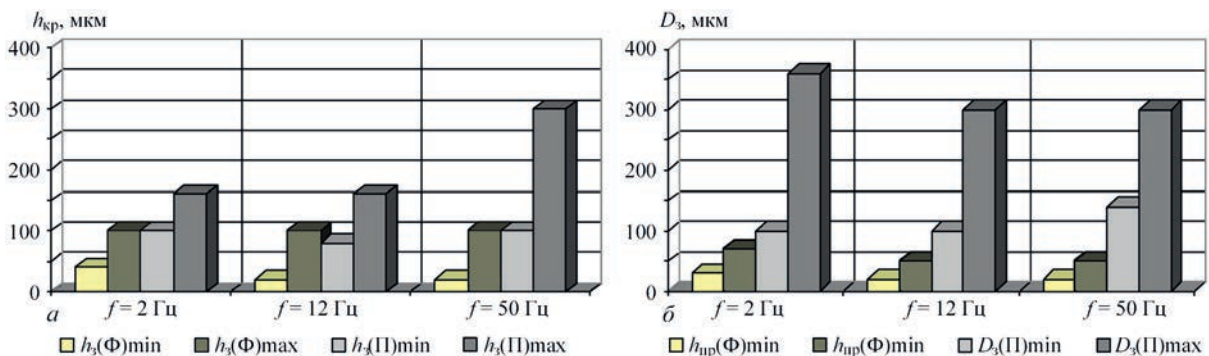


Рис. 2. Мікроструктура ( $\times 250$ ) лінії сплавлення зварних з'єднань сталі 09Г2С, які отримані при різній частоті: а –  $f = 2$  Гц; б – 12; в – 50

Таблиця 2. Ширина ділянок ЗТВ ( $\delta$ , мкм), розмір зерен ( $D_3$ , мкм) та мікротвердість ( $HV$ , МПа) металу ЗТВ зварних з'єднань при різній частоті ( $f$ ) ПДМП

Зона	$\delta$	$D_3(\Phi) h_{np}(\Phi)^*$	$D_3(\Pi)$	$HV(\Phi)$	$HV(\Pi)$
$f = 2 \text{ Гц}$					
I ЗТВ	1300	30...70*	100...360	1810...1990*	2130...2210
II ЗТВ	1200	30...70	30...80	1870...1930	2060
III ЗТВ	1000	20...30	10...40	1810...1930	
IV ЗТВ	800	20...50	10...50	1870	
$f = 12 \text{ Гц}$					
I ЗТВ	1650	20...50*	100...300	1760...1860*	2060
II ЗТВ	1000	50...100	30...100	1860	2060
III ЗТВ	1250	30...50	20...40	1700...1930	
IV ЗТВ	950	30...70	20...50	1650...1870	
$f = 50 \text{ Гц}$					
I ЗТВ	1400	20...50*	140...300	1810...1870*	1890...2210
II ЗТВ	1500	20...80	50...100	1810...1870	2060
III ЗТВ	800	20...50	10...30	1760...1990	
IV ЗТВ	800	20...50	10...40	1600...1990	

Рис. 3. Зміна структурних параметрів у металі зварних з'єднань сталі 09Г2С, що отримані: із застосуванням ПДМП при різній частоті  $f$ :  $a$  – ширина кристалітів ( $h_{кр}$ ) в металі зварного шва;  $b$  – розмір зерен перліту ( $D_3(\Pi)$ ) та товщина феритних прошарків ( $h_{np}(\Phi)$ ) у I ЗТВ

ної структури на цій ділянці. У даному випадку збільшення ширини I ЗТВ, що має місце при підвищенні  $f$  не буде негативно впливати на властивості зварних з'єднань за рахунок подрібнення структури, а також вирівнювання градієнта ( $\Delta\delta$ ) по ширині цієї зони практично у два рази – від  $\Delta\delta = 600$  мкм ( $f = 2$  Гц) до  $\Delta\delta = 300$  мкм ( $f = 12$  Гц) та  $\Delta\delta = 400$  мкм ( $f = 50$  Гц) (табл. 2). Це буде забезпечувати більш рівномірний рівень механічних властивостей зварного з'єднання.

Дослідженнями встановлено, що вплив частоти магнітного поля на структурні зміни найбільш помітний у таких ділянках зварних з'єднань, як шов та I–II ЗТВ. Найбільші градієнти по розміру зеренної структури характерні для металу шва при  $f = 50$  Гц (рис. 3,  $a$ ) та металу I ЗТВ при  $f = 2$  Гц (рис. 3,  $b$ ). При  $f = 12$  Гц забезпечується подрібнення зеренної структури як в металі шва, так і у ділянці перегріву (I ЗТВ).

Таким чином, встановлено, як дія частоти зовнішнього електромагнітного поля, зокрема, при застосуванні ПДМП, впливає на розміри ЗТВ, мікроструктуру, мікротвердість металу швів та ЗТВ у зварних з'єднаннях низьколегованої сталі 09Г2С. Застосування ПДМП при  $f = 12$  Гц забезпечує подрібнення зеренної структури у металі

шва та ділянці перегріву (I ЗТВ), а також рівномірний рівень мікротвердості.

## Висновки

1. Встановлено, що при збільшенні частоти електромагнітного поля від  $f = 2$  до 12 та 50 Гц змінюються мікротвердість та параметри мікроструктури металу швів та ЗТВ зварних з'єднань сталі 09Г2С. При цьому фазовий склад основного металу, металу швів та ЗТВ однаковий – феритно-перлітний.

2. При  $f = 50$  Гц у металі зварного шва ширина кристалітів перлітної складової збільшується в середньому на 48 % із зменшенням мікротвердості на 10 % (у порівнянні з режимом  $f = 2$  Гц) та на 17 % (у порівнянні з режимом  $f = 12$  Гц). Але при  $f = 50$  структура дрібніша в середньому на 17 % у порівнянні з режимом без застосування ЗЕВ.

3. У зразку, що отримано при  $f = 2$  Гц біля ЛС спостерігається незначне підвищення  $HV$  (на 5 %), а у I ЗТВ формується найбільш великозерниста структура.

4. У I ЗТВ зразків при  $f = 12$  та 50 Гц у порівнянні з режимом  $f = 2$  Гц структура подрібнюється, відповідно, на 17 та 29 %. При цьому незначно знижується мікротвердість – у середньому на 5 %.



5. Підвищення від  $f = 2$  до 12 та 50 Гц призводить до збільшення ширини І ЗТВ у середньому на 25 та 8 %, але це не буде негативно впливати на властивості зварних з'єднань за рахунок подрібнення структури, а також вирівнювання градієнта по ширині цієї зони з обох сторін зварних швів.

6. Встановлено, що режим при  $f = 12$  Гц забезпечує найбільш рівномірний рівень мікротвердості як у металі шва, так і по ділянках ЗТВ та формування дрібнозернистої феритно-перлітної структури у зварному з'єднанні.

### Список літератури

1. Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д. (2006) Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (обзор). *Автоматическая сварка*, **10**, 36–44.
2. Кузнецов В.Д., Рыжов Р.Н. (2005) Выбор оптимальных параметров внешнего электромагнитного воздействия при дуговых способах сварки. *Там же*, **6**, 27–31.
3. Грабин В.Ф. (1982) *Металловедение сварки плавлением*. Киев, Наукова думка.
4. Рыжов Р.Н. (2007) Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процесс формирования и кристаллизацию швов. *Сварочное производство*, **2**, 56–58.
5. Ahieieva A.D. (2019) Rational Using of the Controlling Longitudinal and Transverse Magnetic Fields at arc Welding and Surfacing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 582.
6. Кораб Н.Г., Кузнецов В.Д., Черныш В.П. (1990) Оценка воздействия управляющего магнитного поля на кристаллизацию при дуговой сварке. *Автоматическая сварка*, **2**, 33–36.
7. Абралов М.А., Абдурахманов Р.У. (1982) О механизме измельчения первичной структуры металла сварного шва при электромагнитном воздействии. *Там же*, **2**, 18–21.
8. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) О механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). *Автоматичне зварювання*, **3**, 29–33.
9. Размышляев О.Д., Агеева М.В. (2014) Об оптимальности устройств ввода поперечного магнитного поля применительно к процессам дуговой сварки и наплавки. *V Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии и экономика в машиностроении»*. Т. 1, 22–23 мая 2014 г., сс. 83–88.
10. Гольдштейн М.И., Литвинов Б.М., Бронфин В.С. (1986) *Металлофизика высокопрочных сплавов*. Москва, Металлургия.
11. Романив О.Н. (1979) *Вязкость разрушения конструкционных сталей*. Москва, Металлургия.
12. Болдырев А.М., Биржев В.А., Черных А.В. (1992) К расчету гидродинамических параметров жидкого металла на дне сварочной ванны при дуговой сварке. *Сварочное производство*, **2**, 31–33.
13. Болдырев А.М., Биржев В.А., Мартыненко А.И. (2008) Исследование влияния переменного аксиального магнит-

ного поля на процесс плавления электродной проволоки. *Там же*, **2**, 6–8, 63, 64.

14. Размышляев О.Д., Максимов С.Ю., Бердникова О.М. та ін. (2022) Вплив конфігурації зовнішнього електромагнітного поля на структуру металу зварних з'єднань конструкційної сталі. *Автоматичне зварювання*, **10**, 17–21.
15. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. (1978) *Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей*. Киев, Наукова думка.

### References

1. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2006) External electromagnetic effects in the processes of arc welding and surfacing (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 29–35.
2. Kuznetsov, V.D., Ryzhov, R.N. (2005) Choice of optimal parameters of external electromagnetic action in arc methods of welding. *The Paton Welding J.*, **6**, 27–31.
3. Grabin, V.F. (1982) *Metals science of fusion welding*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Ryzhov, R.N. (2007) Influence of pulse electromagnetic effects on process of formation and crystallization of welds. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 56–58 [in Russian].
5. Ahieieva, A.D. (2019) Rational Using of the Controlling Longitudinal and Transverse Magnetic Fields at Arc Welding and Surfacing. *IOP Conference Series: Materials Sci. and Engineering*, 582.
6. Korab, N.G., Kuznetsov, V.D., Chernysh, V.P. (1990) Evaluation of effect of controlling magnetic field on crystallization in arc welding. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 33–36 [in Russian].
7. Abralov, M.A., Abdurakhmanov, R.U. (1982) On refinement mechanism of weld metal primary structure under electromagnetic action. *Ibid.*, **2**, 18–21 [in Russian].
8. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 29–33.
9. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2014) On optimality of input devices of transverse magnetic field with regard to processes of arc welding and surfacing. *In: Proc. of Int. Sci.-Pract. Conf. on Innovative Technologies and Economics in Mechanical Engineering*. Vol.1, 22–23 May, 2014, 83–88.
10. Goldshtein, M.I., Litvinov, B.M., Bronfin, V.S. (1986) *Physics of metals of high-strength alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Romaniv, O.N. (1979) *Fracture toughness of structural steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
12. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1992) To calculation of hydrodynamic parameters of liquid metal on bottom of welding pool in arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 31–33 [in Russian].
13. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Martynenko, A.I. (2008) Examination of influence of alternating axial magnetic field on process of electrode wire melting. *Ibid.*, 2(6–8), 63, 64 [in Russian].
14. Razmyshlyayev, O.D., Maksymov, S.Yu., Berdnikova, O.M. et al. (2022) Effect of external electromagnetic field configuration on metal structure of welded joints of structural steel. *The Paton Welding J.*, **10**, 13–17.
15. Grabin, V.F., Denisenko, A.V. (1978) *Metals science of welding of low- and medium-alloy steels*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

## INFLUENCE OF THE FREQUENCY OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE STRUCTURE OF 09G2S STEEL WELDED JOINTS

O.D. Razmyshlyayev, S.Yu. Maksymov, O.M. Berdnikova, O.O. Prylypko, O.S. Kushnarjova, T.O. Alekseenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Features of metal structure in 09G2S steel welded joints were studied in welding with application of a longitudinal external electromagnetic field. The influence of field frequency ( $f = 2; 12; 50$  Hz) on phase composition, microstructure and microhardness of welded joint metal was studied. It was found that significant changes of structural parameters in the weld metal and in the subzones of the heat-affected zone (HAZ) take place in the studied frequency range. The influence of frequency of electromagnetic impact in low-alloyed steel welding is more pronounced in the metal of the weld and HAZ in the overheated subzone (coarse grain). Application of  $f = 12$  Hz ensured a uniform microhardness level both in the weld metal and in the HAZ subzones, as well as grain structure refinement in the overheated subzone (I HAZ) of 09G2S steel welded joint. 15 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

**Keywords:** 09G2S steel, welded joints, external electromagnetic impact, longitudinal magnetic field, frequency, heat-affected zone, phase composition, microstructural parameters, microhardness

Надійшла до редакції 16.12.2022

# ЗАСТОСУВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ (Огляд)

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

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

Аддитивні технології – узагальнена назва технологій, з якими пов'язують виготовлення деталей за даними цифрової моделі способом пошарового додавання матеріалу. Для сучасної промисловості все дедалі актуальнішим стає аддитивне виготовлення металевих деталей складної форми. Проведено аналіз електродугових, лазерних і електронно-променевих способів реалізації зварювальних аддитивних технологій, а також надано оцінку перспективності та доцільності їх застосування в порівнянні з альтернативним механічним способом виробництва металевих виробів. Визначено переваги та недоліки кожного способу, а також сфери та особливості застосування. Наведено приклади впровадження даних способів у виробництво, а також їх застосування у складі складних зварювальних систем. Незважаючи на відносно низьку енергетичну ефективність лазерних аддитивних технологій, вони відрізняються найбільш високою точністю виготовлення деталей. Електродугові способи реалізації аддитивних технологій, навпаки, мають найвищу енергетичну ефективність, але отримані деталі потребують додаткової механічної обробки через відносно низьку точність виготовлення. Відмічено значну перспективність застосування плазово-дугового способу наплавлення для створення металевих деталей завдяки низькій тепломісткості, високій продуктивності та великому асортименту витратних матеріалів. Розглянута проблематика та особливості наплавлення багатшарових деталей. Визначено перспективність застосування робототехнічних комплексів для вирішення завдань автоматизації процесів аддитивного виготовлення деталей із застосуванням WAAM технології. Робототехнічний комплекс на базі зварювального антропоморфного робота у поєднанні з зовнішніми осями дозволяє суттєво підвищити продуктивність та гнучкість аддитивного виробництва, а додаткове оснащення комплексу системою технічного зору дозволяє підвищити точність WAAM виготовлення деталей. Бібліогр. 29, рис. 8.

*Ключові слова:* зварювальні технології, адитивні технології, металеві вироби, тривимірний друк, електродугове наплавлення, роботизоване обладнання

**Вступ.** Адитивні технології – це процес виготовлення деталей, який полягає у створенні фізичного об'єкта за допомогою електронно-геометричної моделі [1, 2]. На відміну від механічної обробки та формоутворювального виробництва, такого як лиття або штампування, об'єкт створюється шляхом пошарового додавання матеріалу. У сучасній промисловості дедалі актуальнішим стає виготовлення металевих виробів складної форми за допомогою тривимірного друку. Зварювальні адитивні технології дозволяють отримувати деталі різноманітної геометричної форми шляхом пошарового нанесення матеріалу на підкладку або елемент готового виробу, виходячи з цифрової моделі об'єкта, що значно скорочує витрати. Застосування адитивних технологій [3–5] для виготовлення металевих деталей найбільше підходить при невеликих партіях та підвищених вимогах до точності кінцевого продукту [6].

До переваг застосування адитивних технологій у порівнянні з класичними способами виробництва необхідно віднести зменшення людино-годин, необхідних для виготовлення деталей шляхом повної автоматизації, а також зменшення

кількості витратних матеріалів при використанні коштовних сплавів [6–8].

Для оцінки переваг використання адитивних технологій перед традиційними достатньо проаналізувати наступний приклад. Для традиційного виготовлення із прямокутної сталевий заготовки масою 85 кг деталі складної форми масою 18 кг за допомогою станка з ЧПУ необхідно витратити близько 16 людино-годин часу (рис. 1).

Врахувавши вартість заготовки, вартість та час обробки на станку з ЧПУ та кількість металевих відходів, можна помітити досить суттєву вартість кінцевого виробу. Застосувавши технологію наплавлення методом дугового зварювання у середовищі захисних газів для виробництва аналогічної деталі, необхідно витратити в 3 рази менше людино-годин часу. Кількість металевих відходів від обробки наплавленої деталі на станку з ЧПУ буде меншою в 10 разів, оскільки деталь наплавляється з невеликим припуском. В результаті цього кінцева вартість деталі, виготовленої за допомогою адитивних технологій, менша в 2,5 рази, ніж виготовленої традиційним способом (рис. 2) [10].

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

© А.С. Новодранов, Д.Д. Топчев, А.М. Мангольд, Є.В. Шаповалов, В.О. Коляда, 2023





Рис. 1. Процес виготовлення металевої деталі способом механічної обробки [9]

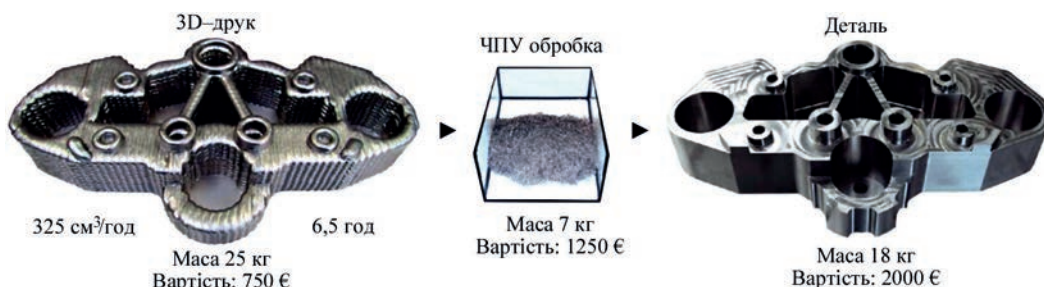


Рис. 2. Процес виготовлення металевої деталі адитивним наплавленням [10]

Важливим параметром для порівняння різних способів адитивного наплавлення є поняття енергетичної ефективності [11], що розглядається як відношення питомої енергії, введеної у заготовку, до загальних витрат енергії на зварювання та допоміжні операції.

Способи адитивних технологій, які використовують як витратний матеріал зварювальний дріт, у залежності від джерела концентрованої енергії поділяються на лазерні, електронно-променеві та електродугові. Необхідно зазначити, що лазерні адитивні технології [12, 13] відрізняються підвищеною точністю у порівнянні з іншими способами [14], проте мають низьку енергетичну ефективність – 2...5 %. Способи електронно-променевого адитивного наплавлення мають значно більшу енергетичну ефективність – 15...20 %, але електронно-променево наплавлення вимагає застосування обладнання для створення вакуумного середовища. Розмір деталей, вироблених за допомогою електронно-променевого наплавлення, має обмеження, які визначаються розмірами вакуумної камери. Також до недоліків даного способу можна віднести складність роботи з вакуумним обладнанням [15].

#### Технологія адитивного наплавлення WAAM.

Адитивне виробництво металевих виробів за допомогою дугового наплавлення під назвою Wire Arc Additive Manufacture (WAAM) є одним з ключових методів гібридного виробництва металевих виробів, що включає адитивні та інші технологічні процеси. Розробка та впровадження гібридних технологій, що поєднують пошарове формування з подальшою термічною та механічною обробкою, є одним із перспективних шляхів подальшого розвитку машинобудування. Нестійкість вільних електричних дуг, акумуляція тепла в металі, що

наплавляється, та інші фактори роблять процес формування виробу складним, мінливим і важкокерованим. Геометрична точність та механічні властивості кінцевого продукту безпосередньо залежать від розмірної точності та способу формування кожного шару [16]. Моделювання форми одиничного шару є основою адитивного процесу, що полягає у визначенні кількості проходів та положення кожного шару. Геометрія наплавленого компонента формується за заданою структурою. На першому етапі задаються геометричні параметри одиничного шару. Після цього проводиться формування шару. Далі здійснюється пошарове формування виробу. Таким чином, геометричні параметри одиничного шару (ширина, висота, профіль) є базовими елементами адитивних технологій на виробництві.

Нідерландська компанія MX3D створила перший у світі сталевий міст за допомогою технології WAAM (рис. 3). Загальна маса мосту близько 6 т, а довжина більше 12 м. Конструкція створювалась за допомогою чотирьох робототехнічних комплексів на базі зварювальних роботів АВВ протягом півроку [17].

У порівнянні з лазерним та електронно-променевим наплавленням електродугове у середовищі захисних газів має значно більшу енергоефективність. Енергоефективність електродугового наплавлення за допомогою методів MIG або TIG може досягати 90 %. Однак слід зазначити, що при використанні електродугового наплавлення можуть виникати залишкові напруження та деформації виробу, викликані інтенсивним нагріванням, а отримані деталі мають характерну «східчасту» поверхню.

Будь-який спосіб адитивного наплавлення повинен забезпечувати сталість форми та якість оди-



Рис. 3. Сталевий міст, створений за технологією WAAM [17]

ничного шару [18]. Форма одиничного шару залежить від наступних факторів:

- властивостей матеріалу;
- теплового стану в зоні наплавлення;
- технологічних особливостей процесу.

Важливими умовами формування багатошарових виробів високої якості є:

- створення металургійного зв'язку шляхом сплавлення з попереднім шаром;
- забезпечення оптимальної швидкості охолодження як підкладки, так і наплавленого матеріалу;
- здійснення надійного захисту рідкого металу.

Асоціація авіаційних досліджень – науково-дослідний інститут аеродинаміки в місті Бедфорд (Велика Британія) виготовила за допомогою робототехнічного комплексу на базі антропоморфного шестиосьового зварювального робота ABB IRB 6400 та технології WAAM модель крила літака довжиною 0,8 м для тестування в аеродинамічній трубі. Крило має порожнисту структуру всередині, а також потребує подальшої механічної обробки з точністю до 0,05 мм [19].

#### Технологія лазерного наплавлення SLM.

Для створення об'ємних металевих деталей високої міцності застосовують технологію селективно-

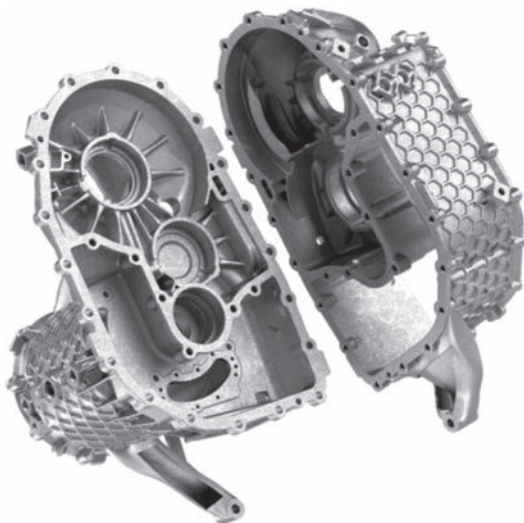


Рис. 4. Корпус силового агрегату, створений способом SLM за допомогою установки NXG XII 600 [20]

го лазерного плавлення (SLM). За допомогою даної технології деталь формується шляхом плавлення порошків різноманітних металів лазерним променем. До переваг даної технології можна віднести високу деталізацію елементів деталі, високу щільність (99 %), а також точність габаритних розмірів (50 мкм). До недоліків технології лазерного наплавлення необхідно віднести високу вартість обладнання, матеріалів та обслуговування, а також відносно низьку швидкість наплавлення (10 см<sup>3</sup>/год.).

Німецька компанія SLM Solutions за допомогою індустріального 3D-принтера NXG XII 600 створила корпус силового агрегату E-Drive для передньої осі автомобілів Porsche (рис. 4). У результаті вдалося зменшити масу деталі, реалізувати інтегровані в корпус деталі системи охолодження, підвищити пружність, а також зменшити час збирання агрегату. NXG XII 600 – це система, створена за технологією SLM, головними функціональними елементами є 12 лазерів потужністю 1000 Вт кожний. Така система може виготовляти до 10000 кг металевих деталей в рік [20].

Група південнокорейських науковців створила прототип паливного бака для ракети-носія за допомогою технології лазерного наплавлення SLM (рис. 5). Для реалізації складної форми бака було застосовано метод спрямованого осадження енергії, метод створення металевих деталей за рахунок плавлення та швидкого затвердіння металевих порошків за допомогою лазерного променя [21].



Рис. 5. Процес наплавлення паливного бака ракети-носія [21]



**Технологія плазмово-дугового наплавлення.** Вирішити недоліки лазерного наплавлення можливо шляхом застосування технології плазмово-дугового наплавлення. До переваг даного способу слід віднести розплавлення будь-якого металу шляхом високої температури плазмової дуги (до 30000 °С), відсутність бризок при напавленні шарів, мінімальне нагрівання раніше напавлених шарів, можливість регулювання габаритних розмірів шару, а також високу продуктивність та економічність використання витратних матеріалів. Технологія плазмово-дугового наплавлення при формуванні металевої деталі дає можливість змінювати склад металу, а також отримувати градієнтну структуру. Все це стає можливим за рахунок великого асортименту витратних матеріалів.

Китайська компанія WALDUN за допомогою плазмово-дугового наплавлення відновлює та наплавляє робочу поверхню шнеків (рис. 6) та циліндрів екструдерів, деталі для атомних електростанцій, промислові різакі, леза та фрези, а також виготовляє стійке до корозійного впливу та стирання промислове обладнання [22].

**Проблематика наплавлення багатошарових деталей.** При побудові багатошарової деталі необхідно забезпечити достатню теплоємність для сплавлення металу (рис. 7). Надлишок тепла, що підводиться, сприяє надмірному проплавленню попереднього шару і розтіканню зварювальної ванни.

Визначення взаємозв'язків між формою шару та параметрами режиму наплавлення, включаючи моделювання всіх фізичних процесів, є досить складним завданням. Параметри наплавлення необхідно обирати згідно з відповідними технічними рекомендаціями. Ключовим завданням розробки технології адитивного формування є створення математичної моделі, що зв'яже профіль одиничного шару з параметрами наплавлення.

Створення технологій пошарового наплавлення виробів вимагає детального вивчення впливу умов виготовлення на експлуатаційні характеристики виробів [24]. Отримання виробів із високими експлуатаційними характеристиками та мінімальним припуском на механічну обробку



Рис. 6. Процес плазмово-дугового наплавлення робочої поверхні шнека [22]



Рис. 7. Наплавлення багатошарової деталі за допомогою технології WAAM [23]

пов'язане з вирішенням великої кількості різноманітних завдань. Розміри ванни рідкого металу визначаються тепловим станом в зоні впливу електричної дуги, яка залежить від багатьох факторів:

- потужності електричної дуги;
- швидкості процесу наплавлення;
- діаметра і швидкості подачі зварювального дроту;
- поперечного перерізу стінки, що наплавляється;
- хімічного складу зварювального дроту;
- якості захисту зварювальної ванни.

Для вирішення питання підтримки теплового балансу під час процесу наплавлення необхідно поточне коригування параметрів режиму або періодичне зупинення процесу для охолодження виробу, що наплавляється. За допомогою коригування параметрів режиму наплавлення, в принципі, можна вийти на режим теплової рівноваги, при якому забезпечується стабільність процесу пошарового наплавлення. Необхідно враховувати те, що розміри ванни рідкого і перегрітого металу, зрештою, визначають структуру і властивості металу, а також якість захисту поверхні, що впливає на дефектність напавлених шарів. Точність формування виробу залежить від форми та розмірів шару, що наплавляється. Тому наявність адекватної математичної моделі наплавлення є ключовим етапом процесу адитивного виробництва.

**Автоматизація процесу адитивного наплавлення.** На фоні глобальної автоматизації виробництв металевих виробів та конструкцій все частіше застосовуються робототехнічні комплекси на базі зварювальних роботів, за допомогою яких здійснюється адитивне наплавлення за технологією WAAM [25, 26]. Застосування робототехнічного комплексу має ряд переваг. Основною

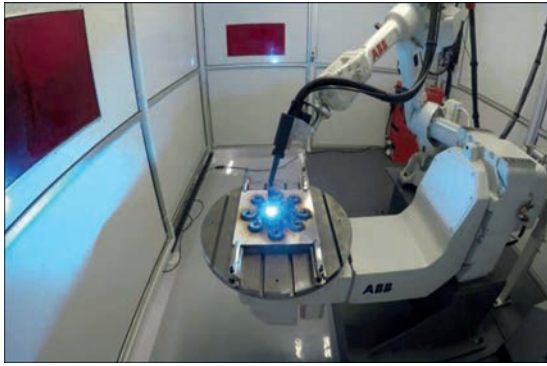


Рис. 8. Робототехнічний комплекс на базі зварювального робота та позиціонера [27]

перевагою є висока точність при пошаровому наплавленні за допомогою технології WAAM, яка може сягати 0,8 мм. Також слід зазначити широкий діапазон розмірів деталей, який обмежений лише радіусом досяжності певної моделі робота. Зазвичай робототехнічний комплекс складається з робота, позиціонера з однією або двома обертальними осями, зварювального обладнання в залежності від обраної технології та програмного забезпечення. Використання позиціонера дозволяє наплавляти вироби складної форми, а саме спіралеподібної та ін. (рис. 8).

У випадках, коли деталь виходить за межі досяжності робота, необхідно застосувати трек для лінійного переміщення робота вздовж робочої області. Якщо необхідно досягти більшої точності, то для пошарового отримання геометричних характеристик отриманого виробу, контролю якості або ідентифікації геометрії наплавленого виробу доречним буде застосування системи технічного зору [28]. Така система є апаратно-програмним комплексом на базі телевізійного датчика, який встановлюється на пальнику робота та у режимі реального часу обмінюється з роботом результатами вимірювань. Отримавши виміряні дані, контролер робота в режимі реального часу обчислює координати та корегує переміщення пальника та/або параметри режиму. Застосувавши програмні можливості робота та дані, отримані від системи технічного зору, на основі оптичного методу неруйнівного контролю об'єкта можна зробити висновки про якісні показники, а саме геометричну точність та відсутність зовнішніх дефектів кінцевого виробу [29].

## Висновки

За результатами аналізу особливостей зварювального адитивного виробництва можна зробити висновок, що застосування адитивних технологій найкраще підходить для виготовлення невеликих партій деталей. Однією з основних переваг адитивного виробництва є зниження собівартості кінцевих виробів при одночасному досягненні підвищення продуктивності у порівнянні

з традиційними методами, такими як механічна обробка. Визначено переваги, недоліки та сфери застосування електронно-дугової, лазерної та плазмово-дугової адитивних технологій. Серед розглянутих методів адитивного виробництва металевих виробів найбільш перспективним обрано плазмово-дуговий. Дана технологія дає можливість створювати деталі складної форми та високої якості за рахунок відсутності бризок при наплавленні шарів, мінімального нагрівання раніше наплавлених шарів, можливості регулювання габаритних розмірів шару, а також високої продуктивності та економічності використання витратних матеріалів. Застосування плазмово-дугового методу вирішує питання теплового балансу, енергоефективності, а також контролю розміру наплавленого шару при виготовленні багатошарових деталей.

У напрямку автоматизації адитивного виробництва розглянуто перспективність та доцільність застосування робототехнічного комплексу на базі зварювального робота у поєднанні з позиціонером. Застосування антропоморфного зварювального робота підвищує продуктивність, яка досягається шляхом зменшення впливу людини на технологію виробництва, а також можливість завантаження робототехнічного комплексу в режимі «24/7».

## Список літератури/References

1. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S. et al. (2018) Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224.
2. Dickens, P.M. (1992) Rapid prototyping using 3-D welding. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 280–290.
3. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. (2015) Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1–4), 465–481.
4. Пелешенко С.И., Коржик В.Н., Войтенко А.Н. и др. (2017) Анализ современного состояния аддитивных сварочных технологий изготовления объемных металлических изделий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 3/1(87), 42–52.  
Peleshenko, S.I., Korzhik, V.N., Voitenko, A.N. et al. (2017) Analysis of modern state of additive welding technologies for producing bulk metallic products. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 3/1(87), 42–52.
5. Wong, K.V. (2012) A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Network Mechanical Engineering*, Article ID 208760.
6. Жуков В.В., Григоренко Г.М., Шаповалов В.А. (2016) Аддитивное производство металлических изделий (Обзор). *Автоматическая сварка*, 5–6(753), 148–153.  
Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding J.*, 5–6(753), 137–142.
7. Michaels, S., Sachs, E.M., Cima, M.J. (1992) Metal parts generation by three dimensional printing. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 244–250.
8. Frazier, W.E. (2014) Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928.
9. RUDOLF SIEVERS [Електронний ресурс]. *Großbauteile aus Metall*. <https://www.rudolf-sievers.de/fileadmin-pft21/RS/3D-Druck/PDF/RUDOLF%20SIEVERS%20-%203D-Druck%20Flyer%20DMP.pdf>



10. Kazanas, P., Deherkar, P., Almeida, P. et al. (2012) Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 226(6), 1042–1051.
11. Каракозов Э.С., Мустафаев Р.И. (1992) *Оценка эффективности сварочных процессов*. Справочник молодого электросварщика, 46–47.  
Karakozov, E.S., Mustafaev, R.I. (1992) *Evaluation of efficiency of welding processes*: Refer. book of young welder, 46–47 [in Russian].
12. Kruth, J.P. (2004) Selective laser melting of iron-based powder. *J. Mater. Process. Technol.*, 149, 616–622.
13. Kruth, J.P. (1998) Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 47(2), 525–540.
14. Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., Antonysamy, A.A. (2012) Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured. *Metallurgical and Materials Transactions*, 44, 968–977.
15. Li Johnnie Liew Zhonga, Alkahari Mohd Rizala, Rosli Nor Ana Bintia et al. (2019) Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing. *International Journal of Automation Technology*, 13(3), 346–353.
16. Karunakaran, K.P., Suryakumar, S., Pushpa, V., Akula, S. (2010) Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 490–499.
17. (2018) Dezeen [Электронный ресурс]. *Robots complete span of 3D-printed bridge for Amsterdam canal*. <https://www.dezeen.com/2018/04/17/mx3d-3d-printed-bridge-joris-laarman-arup-amsterdam-netherlands/>
18. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А. и др. (2016) Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий (Обзор). *Автоматическая сварка*, 5-6(753), 127–134.  
Korzhih, V.N., Khaskin, V.Yu., Grinyuk, A.A. et al. (2016) 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review). *The Paton Welding J.*, 5-6(753), 117-123.
19. Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J. (2016) Wire+Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*, 7, 641–647.
20. SLM Solution [Электронный ресурс]. *Meet the NXG XII 600 a new era in manufacturing*. <https://www.slm-pushing-the-limits.com/specs#the-nxg>
21. (2021) Money Today [Электронный ресурс]. *3D printers also make propellant tanks for space launch vehicles. One step closer to self-sufficiency in space parts*. <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2021062414002837802>
22. WALDUN [Электронный ресурс]. *PTA Welding Machine | Plasma Transferred Arc Welding (Plasma Transferred Arc) & System*. <https://www.hardfacingfty.com/pta-welding-equipment/>
23. Geofabrica [Электронный ресурс]. *Wire-arc additive manufacturing for metal part fabrication*. <https://geofabrica.com/directed-energy-deposition-waam/>
24. Коржик В.Н., Войтенко А.Н., Пелешенко С.И. и др. (2017) Разработка автоматизированного оборудования для изготовления трехмерных металлических изделий на основе аддитивных технологий. *Автоматическая сварка*, 5-6, 91–98.  
Korzhih, V.N., Vojtenko, A.N., Peleshenko, S.I. et al. (2017) Development of automated equipment for manufacturing 3D metal products based on additive technologies. *The Paton Welding J.*, 5-6, 79-85.
25. Pan Zengxi, Ding Donghong, Wu Bintao et al. (2018) Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 3–24.
26. Guessasma, S., Zhang, W., Zhu, J. et al. (2016) Challenges of additive manufacturing technologies from an optimization perspective. *International Journal for Simulation and Multi-disciplinary Design Optimization*, 6, 9–13.
27. Savyasachi, N., Sijo, Richard, Joel T James et al. (2020) A Review on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7, 4981–4989.
28. Кисилевский Ф.Н., Шаповалов Е.В., Коляда В.А. (2006) Система лазерного слежения за валиком усиления сварного шва. *Автоматическая сварка*, 1, 60–62.  
Kiselevsky, F.N., Shapovalov, E.V., Kolyada, V.A. (2006) System of laser following of weld reinforcement. *The Paton Welding J.*, 1, 60–62.
29. Лобанов Л.М., Шаповалов Е.В., Коляда В.А. (2014) Применение современных информационных технологий для решения задач автоматизации технологических процессов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 20–28.  
Lobanov, L.M., Shapovalov, E.V., Kolyada, V.A. (2014) Application of modern information technologies to solve problems of technological process automation. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 20–28 [in Russian].

## USE OF WELDING ADDITIVE TECHNOLOGIES IN MANUFACTURE OF METAL PARTS OF A COMPLEX SHAPE (Review)

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

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Additive technologies are the generalized name of technologies that associate the manufacture of parts according to the data of a digital model by the method of layer-by-layer adding of material. For the modern industry, additive manufacturing of metal parts of a complex shape is becoming increasingly relevant. The analysis of electric arc, laser and electron beam methods for realization of welding additive technologies as well as evaluation of the prospects and rationality of their use as compared to the alternative mechanical method of manufacturing of metal products was carried out. The advantages and disadvantages of each method as well as areas and features of application were determined. Examples of introduction of these methods in manufacture as well as their use in the composition of complex welding systems are presented. Despite a relatively low energy efficiency of laser additive technologies, they are featured by the highest accuracy of parts manufacturing. Electric arc methods for realization of additive technologies, on the contrary, have the highest energy efficiency, but manufactured parts require additional machining due to a relatively low manufacturing accuracy. A significant prospect in using the plasma-arc method of surfacing for manufacture of metal parts was noted due to a low heat capacity, high efficiency and a large range of consumables. The problems and features of surfacing of multilayered parts were considered. The prospects of using robotic complexes for solving the problems of automation of the processes of additive manufacturing of parts using WAAM technology were determined. The robotic complex on the basis of welding anthropomorphic robot in combination with external axes provides a significant increase in efficiency and flexibility of additive manufacturing, and additional equipment of the complex with the system of technical vision allows increasing the accuracy of WAAM of parts manufacturing. 29 Ref., 8 Fig.

*Keywords: welding technologies, additive technologies, metal products, three-dimensional printing, electric arc surfacing, robotic equipment*

Надійшла до редакції 24.10.2022

# ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ КАТОДНОГО ВУЗЛА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ГАРМАТИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

В.І. Загорніков, В.М. Нестеренков, Ю.В. Орса, А.М. Ігнатенко

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

Розглянуто елементи ремонтної технології електронно-променевого зварювання при виробництві металокерамічного катодного вузла потужної зварювальної електронно-променевої гармати. Притаманий електронно-променевому зварюванню низький ступінь тепловиділення в місці накладання зварного шва знижує ризик короблення деталей, що з'єднуються, і забезпечує максимальну відповідність необхідним розмірам вузла. Необхідність ремонту катодного вузла визначили випадки постачання імпортованих ізоляторів, з дефектами у вигляді відхилень товщини від 0,5 до 1,0 мм стінки металевих фланців («коміра») у паяному з'єднанні з ізолятором. Потрібно було усунути наслідки порушення режиму механічної обробки коміра ізолятора після паяння. Показані можливі шляхи та схеми ремонтних технологій таких вузлів, що дозволяють уникнути відбраковування коштовних деталей і перевести їх у розряд, що підлягають відновленню. Представлені ремонтні технології передбачають застосування кільцевих вставок-бандажів різної конфігурації для двох варіантів усунення зварювальних дефектів, пов'язаних як з локальним ремонтом кромки, так і ремонтом пошкоджень досить протяжних її ділянок. Вдалося за рахунок правильного вибору форми ремонтних вставок, застосування деяких технологічних прийомів, дотримання точності складання і послідовності ремонтного зварювання зберегти в результаті геометричні розміри і забезпечити функціональність зварного вузла загалом. Бібліогр. 6, табл. 6, рис. 6.

*Ключові слова:* електронно-променеве зварювання, імпульсний режим, нікелевий сплав, катодний вузол, ремонтна кільцева фігура вставка, схеми з'єднань різних етапів зварювання.

**Вступ.** В електронних приладах використовуються види з'єднань, що застосовуються в загальному машинобудуванні (стикове, напусткове та кутове), але форма підготовлених кромок у ряді випадків значно відрізняється від загальноприйнятої. Це з'єднання з відбортуванням кромок замість напусткових або стикових з'єднань. Такі з'єднання дозволяють знизити загальний нагрів деталей, що зварюються, зменшити загальну деформацію вузла, реставрувати з'єднання після розтину для ремонту [1, 2]. Для з'єднань по відбортовці кромок допуски розмірів на складання менш жорсткі, що робить їх пріоритетнішими при виготовленні та ремонті тонкостінних з'єднань [3].

У ремонтних роботах, де необхідно забезпечити мінімальний термічний вплив на виріб (у нашому випадку – катодний вузол (КВ) електронно-променевої гармати (ЕПГ) застосування електронно-променевого зварювання (ЕПЗ)) є перспективним [4].

Оскільки зварювання плавленням електронних приладів виконується без присадного матеріалу і зварний шов формується з металу розплавлюваних кромок зварних виробів, то набуває істотного значення точність виготовлення кромок, що зварюються (товщина проточуваних кромок по периметру кругового стику).

Необхідність розгляду варіантів відновного ремонту даного дорогого вузла визначили випадки

імпортованого постачання для зварювальних ЕПГ комплектів ізоляторів із різною товщиною стінки впаюваного в ізолятор фланця – «коміра». Враховуючи високу вартість обладнання для ЕПЗ, можливість уникнути відбракування окремих вузлів ЕПГ і перевести їх у розряд, що підлягають відновленню за рахунок ремонту, дуже актуальна.

Для ремонту необхідно формування бездефектного зварного з'єднання без пошкодження сусідніх паяних ділянок. Ремонт таких з'єднань раніше не здійснювався, тому розробка елементів ремонтних технологій на прикладі складання з'єднання «ніжки» (КВ) в паяний «комір» керамічного ізолятора ЕПГ набуває актуального характеру. Зварювання по відбортуванню кромок не викликало труднощів до тих пір, поки не виникла необхідність отримати вакуумнощільний шов по відбортовці за наявності по периметру різної товщини стінки «коміра» ізолятора внаслідок його проточки після паяння з порушенням технологічного режиму. У процесі зварювання у місцях витончення стінки стику відбувався локальний перепал з порушенням вакуумної щільності шва, виникали підрізи, втрата форми шва (рис. 1, а, б). Такий варіант можливий, майже неминучий внаслідок порушення режиму механічної обробки «коміра» ізолятора після паяння та перед зварюванням. Повторний, «косметичний» прохід у цьому випадку виявився малоефективним, що й зажадало розробки інших прийомів ремонтної технології.

Загорніков В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-0456-173X>, Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>,

Орса Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1208-4171>

© В.І. Загорніков, В.М. Нестеренков, Ю.В. Орса, А.М. Ігнатенко, 2023



Реальне втілення в нашій роботі знайшли наступні технологічні ремонтні прийоми та правила:

- попередження перепалу та оплавлення тонких кромок у зоні зварного шва шляхом збільшення перетину деталей вставками для віддалення кромки від зони зварювання;
- видалення дефектів повторними проходами із постановкою прокладок – кільцевих вставок різної конфігурації;
- імпульсний режим, який забезпечує мінімальні питомі тепловкладення в зону зварювання та точне регулювання потужності, зводить до мінімуму небезпеку пропалу та короблення тонкостінних з'єднань (менше 1...2 мм);
- одержання необхідної форми шва для усунення кореневих дефектів. В основному реалізується вибором рівня фокусування пучка та розгортки електронного пучка;
- забезпечення локальної жорсткості закріплення стику, що зварюється, шляхом постановки численних прихваток, тобто попереднім зварюванням кромок в декількох точках по довжині стику.

Розробка оснастки з точною фіксацією затискачем деталей з зусиллями, що не виключають можливість вільної усадки і перешкоджає розвитку гарячих тріщин при усадці швів. Тобто забезпечення зниження жорсткості закріплення заготовок, що зварюються.

Метою даної роботи є розробка ремонтної технології складання та зварювання КВ, що входить до складу зварювальної ЕПГ з урахуванням необхідності усунення наслідків порушення режиму механічної обробки «коміра» ізолятора після паяння.

Ставилося завдання розробити ремонтну технологію, яка завдяки раціональному проектуванню зварних ремонтних елементів, застосуванню технологічних прийомів ЕПЗ та використанню сучасної зварювальної техніки суттєво здешевить вартість виготовлення та ремонту вузлів електронної техніки.

**Матеріали та методика досліджень.** Дослідження виконували на лабораторній установці для ЕПЗ типу УЛ-112 конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, що має робочу камеру із внутрішніми розмірами 600×600×600 мм. Установка має порівняно просту конструкцію із стаціонарно закріпленою зовнішньою зварювальною гарматою,

оснащена маніпулятором, який забезпечує лінійне переміщення столу вздовж координат  $X$ ,  $Y$ . Як конструкційний матеріал для виготовлення КВ використовувався сплав ковар 29НК. Для відпрацювання техніки зварювання КВ в тонкостінний фланець («комір») ізолятора обертач установки був забезпечений високоточним CNC-керованим електроприводом (комп'ютерне числове керування). Застосовувалося високовольтне джерело живлення потужністю 15 кВт при прискорювальній напрузі 60 кВ. Емісійна система зварювальної гармати забезпечувала струм електронного пучка завбільшки до 250 мА. Для поєднання електронного пучка зі зварюваним стиком використовувалася коаксіальна система телеспостереження. Застосування коаксіальної системи телеспостереження дозволяє реалізувати точне позиціонування осі електронного пучка з стиком, що зварюється [3].

#### Експериментальна частина та обговорення.

Виявлено вплив підготовки зварних кромок на якість зварних з'єднань. Щоб забезпечити високу якість зварного шва поверхні, що стикаються, обов'язково піддаються очищенню від засобів консервації, забруднень, іржі та оксидних плівок. Безпосередньо перед зварюванням зовнішню поверхню деталей, що зварюються, в області стику можна очищати за допомогою малопотужного скануючого електронного пучка, не допускаючи оплавлення кромок для можливості програмного коригування положення електронного пучка щодо стику під час зварювання.

При розробці технології зварювання зразки-імітатори для відпрацювання режимів зварювання не повністю відображали напружено-деформаційний стан реального зварного з'єднання [5]. Проте попередній досвід зварювання деталей такого типу дозволив звести до мінімуму кількість регульованих параметрів для отримання якісного шва. До них можна віднести діапазон припустимого питомого тепловкладення з т. з. усунення перегріву та порушення вакуумної щільності шва (зварювання в імпульсному режимі), мінімальну величину зазору в стик, кут і місце введення електронного пучка в стик, що зварюється. Максимальна глибина проникання без розбризкування металу може бути досяг-

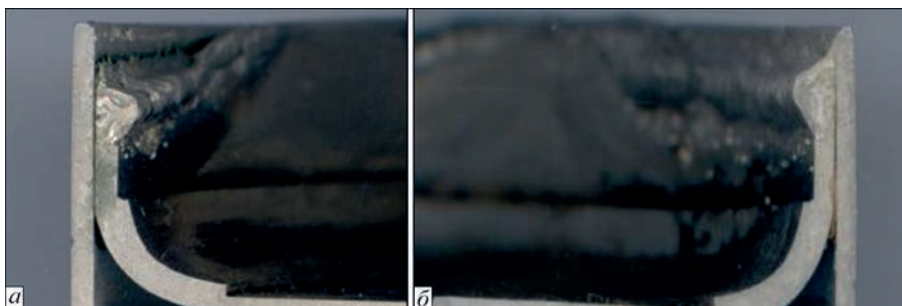


Рис. 1. Дефекти формування зварного з'єднання, спричинені порушенням технологічного режиму складання та зварювання: а – стікання металу шва по внутрішній бічній стінці; б – втрата форми шва, підріз внутрішньої кромки

нута при оптимальному поєднанні збільшеної тривалості імпульсу та зниженої щільності потужності. Коефіцієнт перекриття сусідніх точок – важливий критерій, що впливає на якість зварних швів. Рекомендовані його значення – від 50 до 80 % для отримання щільних швів [2, 6]. Вибір швидкості зварювання здійснювали емпірично на зразках-імітаторах. Для аналізованих товщин вибір швидкості зварювання в районі 10 мм/с підвищував можливість отримання якісного формування зварного шва. На підставі проведених розрахунків та експериментів було визначено такі параметри імпульсного режиму ЕПЗ:

Прискорювальна напруга $U_{np}$ . . . . .	60 кВ
Струм пучка . . . . .	13,5...15,0
Робоча відстань, мм . . . . .	70...300
Частота проходження імпульсів $F$ , Гц . . . . .	30
Тривалість імпульсу $\tau_p$ , мс . . . . .	16,5
Тривалість паузи $\tau_p$ , мс . . . . .	16,5

Для успішного виконання зварювання з повним проплавленням і відсутності несплавлення кромки необхідно розфокусувати електронний промінь таким чином, щоб на поверхні кромки, що зварюються, фокальна пляма променя становила не менше 0,8 мм і не більше 1,0 мм. Значення розміру фокальної плями встановлено дослідним шляхом. Фокус променя підтягувався на 1...2 мм відносно поверхні кромки, що зварюється (гостре фокусування  $I_{fo}$  плюс 15...25 мА). Регулювання цих значень може значно підвищити стабільність зварювальної ванни, виключити розбризкування металу. Відсутність розбризкування металу зварювальної ванни значно покращує естетичний вигляд виробу, а також знижує ймовірність появи поверхневої корозії.

Необхідно враховувати також той факт (пов'язаний з особливостями самого способу ЕПЗ), що при збільшенні зазорів понад певної межі отримати задовільне формування швів без підрізів і пропалів практично неможливо. Розміри зазорів дуже критичні, оскільки сама товщина стінки паяного фланця – коміра становить в деяких місцях всього 0,5 мм. Розроблені конструкції складально-зварювального оснащення забезпечували додавання стикового з'єднання з мінімальними (не більше 0,08 мм) зазорами по торцевих поверх-

нях і гарантованим натягом по циліндричних [1, 5]. Негативний вплив зазорів на форму шва було усунуто. Перевірка точності складання проводилася шаблонами та щупами. Для того, щоб у процесі зварювання встановлені зазори та положення тонкостінних деталей не змінювалися, перед зварюванням роблять попередню прихватку деталей. Прихватки покликані позиціонувати елементи, що стикуються, зберігаючи при цьому їх форму і розміри перед остаточним ЕПЗ [4, 5]. Щоб уникнути перегріву виробу та порушення герметичної щільності швів необхідно максимально скоротити введення та виведення струму при постановці прихваток. Довжина кожної із двох лінійних прихваток має бути не менше ніж 2...5 товщин основного металу. Розміри перерізу прихваток повинні бути такими, щоб вони розплавлялися повністю при накладенні основних швів (рис. 2).

Зі зменшенням відстані між прихватками зменшується максимальне зміщення стику під час проведення основного зварювального проходу електронним променем [4]. Наголошується на пріоритетності точкових прихваток над лінійними з погляду мінімізації тепловкладання в шов та зниження деформацій. Тому найчастіше при явній різниці у товщині стінок деталей замість лінійних прихваток, що зварюються, застосовувалися численні точкові. Рекомендується для зниження тепловкладання використовувати точкові прихватки, які розставляються діаметрально протилежно (хрест-навхрест) у кількості 8...16 шт. Струм фокусувальної лінзи відповідав гострому фокусуванню на даній робочій відстані – 200 мм ( $I_{fo}$  = 600 мА плюс 25 мА).

Режим виконання зварювальних прихваток наведено у табл. 1 та 2.

Формування шва необхідної форми з плавним (без підрізів) переходом від поверхні шва до основного металу здійснювалося за рахунок правильного розподілу концентрації електронного пучка. У всіх випадках з'єднання виконується ЕПЗ з вимогою (обґрунтуванням) мінімально допустимих розмірів швів та обмеженням числа повторних проходів (рис. 3). Для зменшення ймовірності утворення пор та тріщин, оплавлення кромки з втратою їх форми кількість повторних ремонтних проходів не повинна перевищувати двох.



Рис. 2. Початковий фрагмент шва (а) та прихватка (б)



Таблиця 1. Параметри режиму виконання зварювальних точкових прихваток (без модуляції)

Струм пучка $I_b$ , мА	Струм фокусуєної лінзи на поверхні $I_{fo}$ , мА	Робочий струм фокусуєної лінзи $I_p$ , мА	Робоча відстань, мм
4	600	625	200

Таблиця 2. Параметри режиму виконання зварювальних прихваток (з модуляцією)

Струм пучка $I_b$ , мА*	Струм фокусуєної лінзи на поверхні $I_{fo}$ , мА	Робочий струм фокусуєної лінзи $I_p$ , мА	Робоча відстань, мм	Швидкість зварювання $V_{ш}$ , мм/с
8	600	625	200	10

\* – зварювання в імпульсному режимі

**Складання під зварювання, відповідне технологічне оснащення, вибір режимів зварювання за двома варіантами.** Принципові особливості методів фіксації елементів КВ при його збиранні під зварювання та основні положення технології ЕПЗ КВ були розроблені раніше у роботі [3].

Для двох варіантів усунення зварювальних дефектів ремонтні технології на заключній стадії операції виготовлення з'єднання «КВ в зборі» передбачають застосування кільцевих вставок різної конфігурації та використання їх як бандаж для забезпечення розрахункової міцності та точності розмірів вузла.

Подібні конструкції вставок прості і вигідні тим, що забезпечують достатню кількість додаткового металу, фіксацію і щільний контакт деталей, що стикаються. Було розроблено схему зварного ремонтного з'єднання, принципово незалежну від цього, локальний це чи протяжний дефект.

Перед тим як зварювати КВ, його необхідно встановити в оправку і щоразу перевіряти радіальне биття, яке не повинно перевищувати  $\pm 0,05$  мм.

Розглянемо детальніше два варіанти проведення ремонту.

*Варіант № 1. Приварювання у два етапи КВ в паяний фланець керамічного ізолятора ЕПЗ за наявності різної по периметру товщини вертикальної стінки фланця (0,5...1,0 мм).* Тут отримати вакуумнощільний шов можна після відповідної

підготовки місця зварювання, установки встик з отбортовкою кромки фігурної кільцевої вставки, що залишається, з подальшим проведенням ЕПЗ з двох сторін в імпульсному режимі.

Складально-зварювальний пристрій являє собою встановлену та закріплену на обертачі підставку. Зібраний на ній під ЕПЗ ізолятор з фігурною кільцевою вставкою фіксується фланцем та шпильками. Захист керамічної поверхні ізолятора від напilenня парами металу при ЕПЗ на робочій потужності здійснювався алюмінієвою фольгою зовні та вставками з немагнітного матеріалу безпосередньо в районі стику.

Кільцева вставка в першому варіанті була застосована виходячи з необхідності надати крайкам приблизно однакові розміри перерізу (рис. 4). Така вставка покликана знизити критичність недотримання однакової (1,0 мм) товщини по периметру стінки впаяного в ізолятор тонкостінного «коміра». Застосування такої форми технологічної вставки дозволяє точно зафіксувати з мінімальним зазором зварювані кромки та забезпечити їх паралельність. У процесі зварювання джерело тепла (електронний промінь) впливає переважно на полицю фігурної підкладки, що значно знижує перегрів деталей, що зварюються, і дає можливість уникнути появи пропалів у стику. При вварюванні «ніжки» в ізолятор, що ремонту-

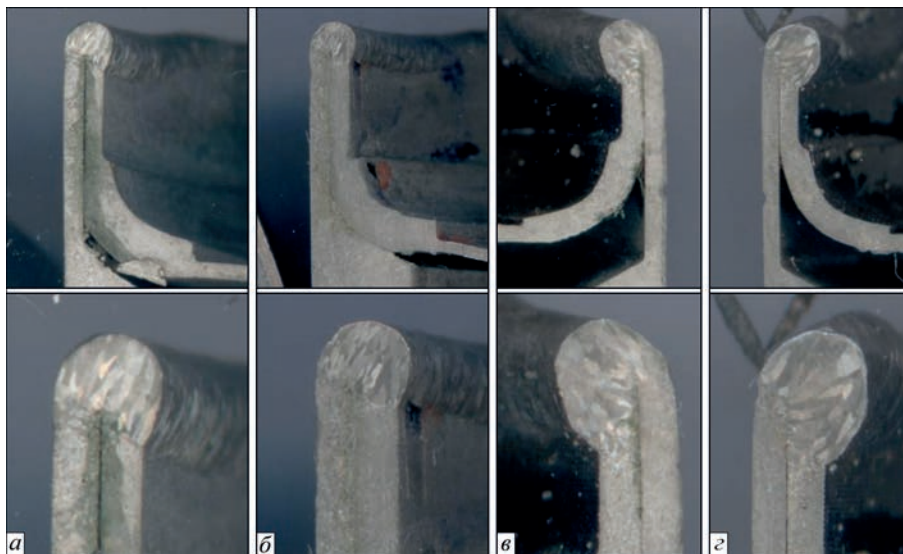


Рис. 3. Поперечні макрошліфи на зразках-імітаторах різних режимів електронно-променевого шва з двостороннім відбортуванням кромки з одним і множинними ремонтними проходами: ЕПЗ у стандартному режимі (а), імпульсна ЕПЗ (б), подвійний переплав у імпульсному режимі (в), потрійний переплав у імпульсному режимі (г)

ється, використовувався захист керамічної поверхні ізолятора у вигляді екрануючого пристрою з немагнітного матеріалу. Зверху через шпильки пружне «коромисло» служить фіксатором усієї конструкції в кондукторі і через нього здійснюється заземлення всіх елементів КВ. Визначено вибір раціональної (з точки зору зниження залишкових зварювальних деформацій) послідовності накладання ремонтних зварних швів при зварюванні з лицьового та зворотного боку стику з'єднання «КВ-ізолятор». Спочатку проводилася операція фіксування фігурної кільцевої вставки до бракованого «коміра» ізолятора (шов № 1). Потім, після зняття припуску на механічну обробку, проводилася операція остаточного складання та приварювання за допомогою ЕПЗ «ніжки» до ізолятора (шов № 2).

Режим виконання першого зварювального проходу (шов № 1) представлено у табл. 3.

Режим другого зварювального проходу (шов № 2) представлено у табл. 4.

*Варіант № 2. Реставрація «ніжки» після вирізки її зі складального шва з протяжним лінійним дефектом.* У цьому випадку реставрація піддавалася «ніжки», а не «коміру» ізолятора. Для здійснення цієї ремонтної операції необхідно вирізати «ніжки» ізолятора і, після приварювання вставки-бандажа, повторне складання-зварювання.

Форма бандажа відрізнялася від варіанта № 1 відсутністю горизонтальної полиці та наявністю упору в стінку «ніжки», для кращої фіксації, збереження жорсткості вузла. Центр плями нагрівання зміщують у бік бандажа-вставки, що має більшу товщину (рис. 5, а).

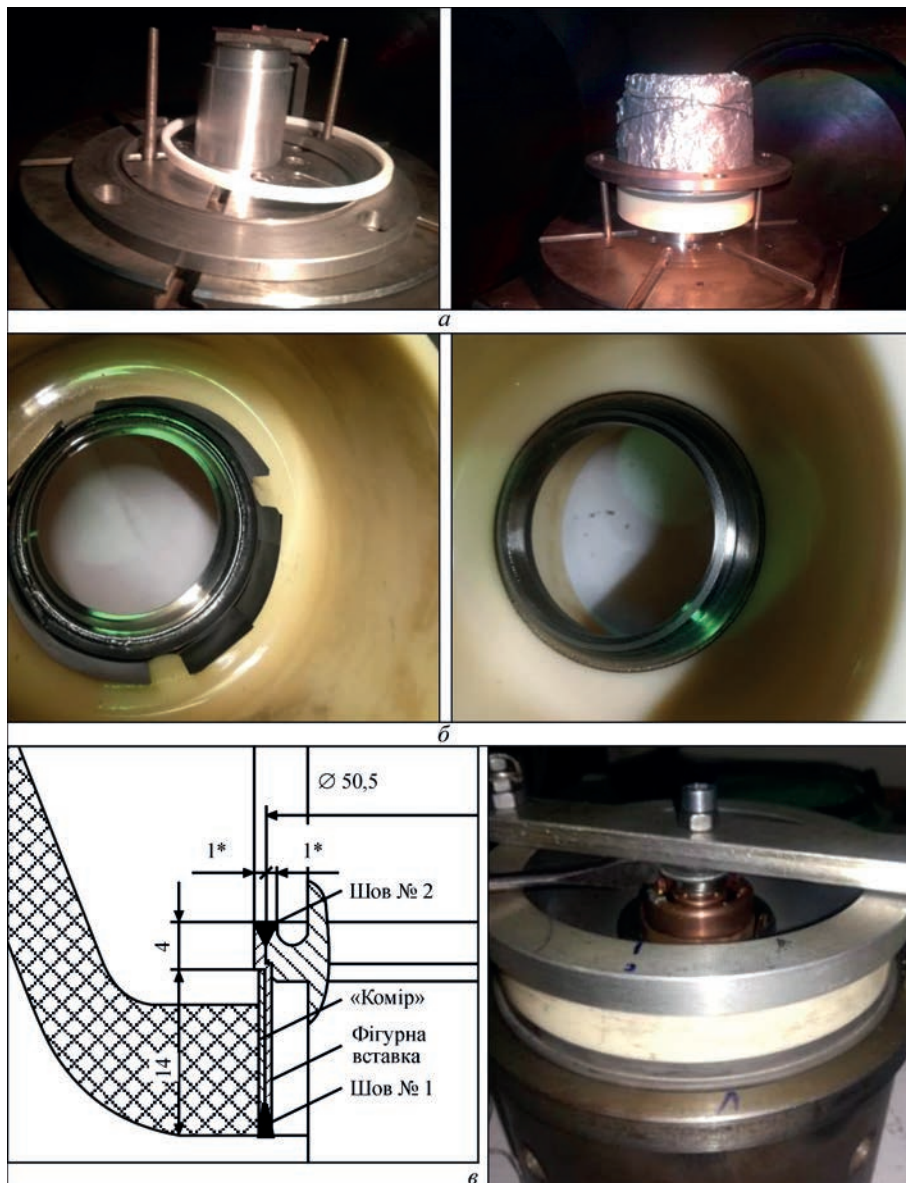


Рис. 4. Етапи проведення ремонтних робіт за варіантом № 1: а – складально-зварювальний пристрій з підкладанням під ЕПЗ ізолятора з фігурною кільцевою вставкою за варіантом № 1; б – вигляд шва з фігурною кільцевою вставкою за варіантом № 1 після ЕПЗ та після механічної обробки шва у розмір; в – фрагмент кільцевого з'єднання «коміра» з фігурною вставкою за варіантом № 1 та остаточне складання



Таблиця 3. Параметри режиму виконання зварювального проходу з модуляцією (шов № 1)

Струм пучка $I_b$ , мА *	Струм фокусувальної лінзи на поверхні $I_{fo}$ , мА	Робочий струм фокусувальної лінзи $I_f$ , мА	Робоча відстань, мм	Швидкість зварювання $V_{ш}$ , мм/с	Кут нахилу виробу $\alpha^\circ$
13,5	600	615	260	10	5

\* - зварювання в імпульсному режимі  
Примітка:  $I_{fo} = 600$  мА відповідає гострому фокусуванню електронного пучка на поверхні, що зварюється. Розмір робочої відстані – 260 мм.

Таблиця 4. Параметри режиму виконання зварювального проходу з модуляцією (шов № 2)

Струм пучка $I_b$ , мА *	Струм фокусувальної лінзи на поверхні $I_{fo}$ , мА	Робочий струм фокусувальної лінзи $I_f$ , мА	Робоча відстань, мм	Швидкість зварювання $V_{ш}$ , мм/с	Кут нахилу виробу $\alpha^\circ$
15	700	715	70	10	10

Примітка:  $I_{fo} = 700$  мА відповідає гострому фокусуванню електронного пучка на поверхні, що зварюється. Розмір робочої відстані – 70 мм.

Параметри режиму цього варіанту зварювання були встановлені виходячи з умов отримання вакуумнощільного шва з хорошим зовнішнім формуванням без підрізів, глибиною проплавлення не менше 2,0 мм та відсутності кореневих дефектів. Вибір оптимальної для ЕПЗ вставки-бандажа за варіантом № 2 та відповідних параметрів режиму зварювання дозволили вирішити задачу відновлення геометричних розмірів вирізаної з ізолятора «ніжки».

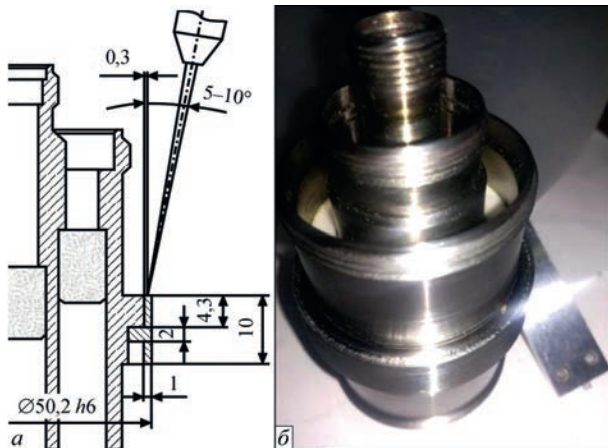


Рис. 5. Схема вварювання вставки за варіантом № 2 (а) та КВ «ніжка» після ЕПЗ і чистої механічної обробки привареної вставки (б)

При вварюванні вставки за варіантом № 2 кут нахилу виробу від вертикалі має відрізнитися від нуля. Необхідність нахилу пояснюється близькістю верхньої вертикальної стінки вузла до зони зварювання, внаслідок чого підвищується ймовірність екранування стінкою частини електронного пучка. Шов розташовувався на торцевій поверхні двостороннього відбортування з незначним відхиленням від вертикалі. Експериментально встановлено, що величина зовнішнього усунення осі електронного пучка від внутрішнього краю торця бандажу, у разі значення кута нахилу виробу  $\alpha$  в межах  $5...10^\circ$  від вертикалі, має становити 0,3 мм. Ці умови забезпечують гарантований провар необхідної форми. Такі незначні величини усунення електронного пучка зручно контролювати із застосуванням коаксіальної системи телеспостереження (рис. 5).

Режим реставрації «ніжки» за допомогою приварювання на неї бандажа без модуляції у звичайному, не імпульсному режимі, показано у табл. 5.

*Остаточне складання КВ.* На заключному етапі (після приварювання ремонтних вставок та їх механічної обробки у розмір) зварювання велося з двостороннім відбортуванням кромки, що виключає необхідність нахилу виробу, зберігаючи всі переваги цієї схеми (рис. 6).

Таблиця 5. Параметри режиму виконання зварювального проходу без модуляції

Струм пучка $I_b$ , мА	Струм фокусувальної лінзи на поверхні $I_{fo}$ , мА	Робочий струм фокусувальної лінзи $I_f$ , мА	Робоча відстань, мм	Швидкість зварювання $V_{ш}$ , мм/с	Кут нахилу виробу $\alpha^\circ$
12	635	650	130	10	$5...10$

Примітка:  $I_{fo} = 635$  мА відповідає гострому фокусуванню електронного пучка на поверхні, що зварюється. Розмір робочої відстані – 130 мм.



Рис. 6. Загальний вигляд відремонтованого КВ ЕПГ зовні (а) та зсередини (б)

**Таблиця 6. Параметри режиму зварювання «ніжки» (КВ) в паяний «комір» керамічного ізолятора ЕПГ**

Струм пучка $I_b$ , мА*	Струм фокусувальної лінзи $I_f$ , мА	Швидкість зварювання $V_w$ , мм/с
12	$I_{f0} + 20$	10

\*Зварювання в імпульсному режимі.  
Примітка:  $I_{f0} = 600$  мА відповідає гострому фокусуванню електронного пучка на поверхні, що зварюється. Розмір робочої відстані – 220 мм.

Режим кінцевої операції виконання зварювання «ніжки» (КВ) в паяний «комір» керамічного ізолятора ЕПГ наведено у табл. 6.

Наявність сучасної зварювальної апаратури в комбінації із попередньо продуманою та вивірною конструкцією зварного вузла, правильно обраний тип зварного шва, дозволили виключити деформацію деталей, звести до мінімуму відсоток браку. Поля допусків геометричних розмірів КВ після завершення всіх етапів зварювання було дотримано. Форми виробу збережено.

Технологія пройшла перевірку під час роботи штатних виробів у реальних виробничих умовах. Застосування розробленої технології ЕПЗ після ремонту доведено безперервною роботою КВ протягом 40 год.

Випуск і постачання таких вузлів можуть здійснювати організації-розробники, підприємства-виробники енергоблоків та установок для ЕПЗ, підприємства малого бізнесу.

## Висновки

1. У роботі обґрунтовано метод технологічних вставок, який дозволяє усунути не тільки дефекти зварювання катодного вузла, а й отримати якісне вакуумно-щільне з'єднання на дорогій деталі, виготовленої з порушенням геометричних розмірів при її механічній обробці (відхилення у розмірах товщини вертикальної стінки по периметру зварюваного фланця ізолятора).

2. Відпрацьовано технологію ремонту двох типів дефектів – за наявності різної по периметру товщини вертикальної стінки фланця та після вирізки

її зі складального шва за протяжним лінійним дефектом. Ремонт обох типів дефектів здійснюється за допомогою вставок – кілець різної конфігурації.

3. Ухвалена технологія зварювання була успішно застосована при ремонті КВ. Якість, довговічність, надійність – ці властивості були підтверджені в процесі експлуатації відремонтованих реальних виробів і вони стали критерієм правильності розробленої технології.

## Список літератури

1. Технологічні особливості зварювання плавленням <https://msd.com.ua › technologicalicheskie-osobennosti-svarki-pla...>
2. Особливості зварювання плавленням матеріалів для електронного машинобудування. <https://msd.com.ua › osobennosti-svarki-plavleniem-ma>.
3. Нестеренков В.М., Загорніков В.І., Орса Ю.В., Ігнатенко О.М. (2020) Особливості застосування електронно-променевого зварювання при виготовленні катодного вузла електронної гармати. *Автоматичне зварювання*, 2, 33–37.
4. Нестеренков В.М., Хрипко К.С., Матвейчук В.А. (2018) Електронно-лучевые технологии сварки, наплавки, прототипирования – результаты и перспективы. *Там же*, 11-12, 142–149.
5. Махненко О.В., Зайффарт П. (2008) Расчетное прогнозирование общих деформаций сварных балок при лазерной сварке. *Автоматическая сварка*, 3, 14–20.
6. Слободян М. (2021) Сопrotивление, електронно- и лазерно-лучевая сварка циркониевых сплавов для ядерной энергетики. *Ядерная инженерия и технологии*, 53, 4, 1049–1078. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>

## References

1. Technological features of fusion welding. <https://msd.com.ua>
2. Features of fusion welding for electronic mechanical engineering. <https://msd.com.ua › osobennosti-svarki-plavleniem-ma>.
3. Nesterenkov, V.M., Zagornikov, V.I., Orsa, Yu.V., Ignatenko, O.M. (2020) Features of applying electron beam welding in manufacture of the cathode assembly of the electron gun. *The Paton Welding J.*, 2, 33–37.
4. Nesterenkov, V.M., Khripko, K.S., Matviichuk, V.A. (2018) Electron beam technologies of welding, surfacing, prototyping: Results and prospects. *The Paton Welding J.*, 11-12, 126-133.
5. Makhnenko, O.V., Seyffarth, P. (2008) Calculation prediction of overall distortions in laser welded beams. *The Paton Welding J.*, 3, 6-12.
6. Slobodyan, M. (2021) Resistance, electron and laser welding of zirconium alloys for nuclear power engineering. *Yadernaya Inzheneriya i Tekhnologii*, 53(4), 1049–1078 [in Russian]. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>

## TECHNOLOGIES FOR REPAIRING OF CATHODE UNIT OF ELECTRON BEAM GUN WITH THE USE OF ELECTRON BEAM WELDING

V.I. Zagornikov, V.M. Nesterenkov, Yu.V. Orsa, A.M. Ignatenko

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

The elements of repair technology of electron beam welding in the manufacture of a metal-ceramic cathode unit of a powerful welding electron beam gun are considered. A low degree of heat generation at the place of weld overlapping inherent in electron beam welding reduces the risk of buckling parts being joined and provides the maximum compliance with the required sizes of the unit. The need in repair of the cathode unit was determined by the cases of supplying imported insulators with defects in the form of deviations of a thickness from 0.5 to 1.0 mm in the wall of the metal flange («collar») in the brazed joint with the insulator. It was necessary to eliminate the consequences of a violation of the mechanical treatment of the insulator collar after brazing. The possible ways and schemes of repair technologies of such units are shown that allow avoiding the rejection of valuable parts and transferring them to the category of those subjected to restoration. The presented repair technologies involve the use of circumferential inserts-bandages of different configuration for two variants to eliminate welding defects associated both with local repair of the edge as well as with repair of its quite elongated areas. Due to a correct choice of the shape of repair inserts, the use of some technological methods and observance of the accuracy of assembly and the sequence of repair welding, it became possible to preserve geometric dimensions and to ensure the functionality of the welded assembly as a whole. 6 Ref., 6 Tabl., 6 Fig.

*Keywords:* electron beam welding, pulsed mode, nickel alloy, cathode unit, repair circumferential shaped insert, schemes of joints of different welding stages

Надійшла до редакції 17.12.2022



# ВИСОКОЧАСТОТНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ЖИВИХ ТКАНИН (Огляд)

Г.С. Маринський<sup>1</sup>, В.А. Ткаченко<sup>1</sup>, В.О. Бисько<sup>1</sup>, С.Є. Подпрятів<sup>1,2</sup>, С.С. Подпрятів<sup>1,2</sup>, С.Д. Грабовський<sup>1</sup>, С.В. Ткаченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua),

<sup>2</sup>Київська міська клінічна лікарня № 1. 02091, м. Київ, вул. Харківське шосе, 121. E-mail: [kerz@ukr.net](mailto:kerz@ukr.net)

Технологія та обладнання для високочастотного зварювання та обробки (коагуляція, різання) живих тканин в хірургії все ширше використовуються в медичній практиці в багатьох країнах світу. В даній роботі, що була виконана як на базі представлених в мережі Інтернет матеріалів, так і власних матеріалів авторів, наданий загальний огляд найбільш типових представників такого базового обладнання, яке пропонується основними провідними світовими виробниками. Наведено та проаналізовано основні особливості та переваги відповідного обладнання, як це декларується його розробниками. Робота призначена як для користувачів так і для розробників нового устаткування. Бібліогр. 26, табл. 1, рис. 15.

*Ключові слова:* електрозварювальна хірургія, високочастотне зварювання живих тканин, обладнання, світові виробники

**Вступ.** Технологія та обладнання для високочастотного (ВЧ) зварювання та обробки (коагуляція, різання) живих тканин в хірургії все ширше використовуються в медичній практиці в багатьох країнах світу. Слід відзначити, що хоч термін «зварювання», вперше започаткований стосовно з'єднання живих тканин в медицині України, все частіше використовується в іноземній літературі, в тій чи іншій формі, але там він здебільше відноситься до перекриття судин. В Україні термін «зварювання» живих тканин більше розширений, а за різноманітністю електрохірургічних зварювальних процедур [1–4] Україна, безумовно, є світовим лідером.

У даний час у світі виробляється велика кількість високоякісного електрохірургічного обладнання, включаючи зварювальне, яке постійно еволюціонує та удосконалюється. Фактичні потреби в такому обладнанні безупинно зростають, а обсяги світового ринку сягають мільярди доларів США [5]. За нашою приблизною оцінкою, потенційна ємність українського ринку у зварювальних електрокоагуляторів складає щонайменше 1,5...2,0 тис. шт.

**Загальні характеристики та вимоги. Особливості конструкції та структура.** В загальному вигляді обладнання для зварювання живих тканин являє собою ВЧ генератор потужністю на виході, як правило, 15...300 Вт, до якого під'єднаний необхідний інструментарій, через який ВЧ струм безпосередньо впливає на біологічні тканини при монополярній (рис. 1, а) або біполярній (рис. 1, б) схемах підключення [6].

Принциповою відмінністю схем підключення є те, що в разі застосування монополярної схеми до органу, що оперується, підводиться лише один вихід генератора (один електрод), в той час як другий підкладається під тіло пацієнта. У разі застосування біполярної схеми обидва виходи генератора (обидва електроди) підводяться безпосередньо до інструменту. Відповідно, струм протікає між електродами інструмента в дуже обмеженій зоні, що оперується (рис. 2).

Обидві схеми мають свої переваги та недоліки, та широко використовуються на практиці, доповнюючи одна одну. Робоча частота струму на виході генератора, лежить в діапазоні від 300 кГц і вище, як правило, становить 400...500 кГц. Нижній поріг частоти та інші обмеження на застосування частотних діапазонів обумовлені обмеженнями, що накладаються відповідними нормами та стандартами [6]. Слід, однак, відзначити, що існує позитивний практичний досвід використання робочої частоти 66 кГц при біполярній схемі підключення інструментів, що обумовлено, серед іншого, зменшенням втрат у кабелях підключення інструментів зі зниженням частоти струму. Це особливо помітно під час роботи з високою потужністю. Робоча напруга та сила струму, які подаються в зону дії, вибираються, виходячи із характеру живої тканини, яка оперується, схеми підключення та інше.

**Головні виробники.** На даний час електрохірургічне обладнання, що використовується, або може використовуватися для зварювання живих тканин, виробляється багатьма провідними ком-

Маринський Г.С. – <http://orcid.org/0000-0003-0753-0154>, Подпрятів С.С. – <http://orcid.org/0000-0003-1350-7532>,

Бисько А.В. – <http://orcid.org/0000-0003-1574-5630>, Грабовський С.Д. – <http://orcid.org/0000-0002-9082-4059>,

Ткаченко В.А. – <http://orcid.org/0000-0003-2983-778X>, Ткаченко С.В. – <http://orcid.org/0000-0002-5524-6273>,

Подпрятів С.С. – <http://orcid.org/0000-0001-5942-6311>

© Г.С. Маринський, В.А. Ткаченко, В.О. Бисько, С.Є. Подпрятів, С.С. Подпрятів, С.Д. Грабовський, С.В. Ткаченко, 2023

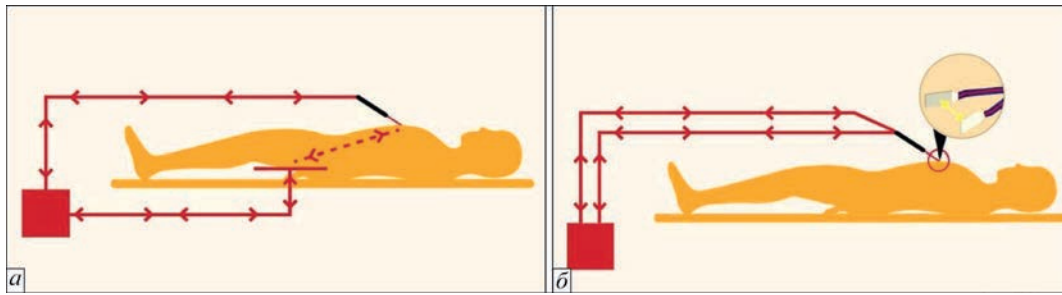


Рис. 1. ВЧ генератор: *a* – монополярна схема; *б* – біполярна схема

паніями різних країн світу. Це, перш за все, Мед-тронік та Джонсон-енд-Джонсон (США), ЕРБЕ, Мартін і Бова (Німеччина) та ін. [7]. Є серед них і українські виробники такі як ТОВ «Контакт» та ТОВ «НДІ прикладної електроніки» (Україна), «Патонмед» (Україна) та деякі інші.

Американська корпорація Medtronic plc – це один із найбільших у світі виробників медичного обладнання, що має операційну та виконавчу штаб-квартиру в м. Міннеаполіс, штат Міннесота (США). У 2015 р. Medtronic оголосив про успішне завершення придбання компанії Covidien plc. Відповідно до умов договору про придбання, Medtronic Inc. та Covidien plc об'єднані в компанію Medtronic plc. На сьогодні, згідно з оприлюдненими даними, в компанії працює близько 90 тис. співробітників, включаючи понад 11 тисяч вчених та інженерів. Вона присутня на ринку більш ніж 150 країн. В минулому році її дохід склав 31,69 млрд USD [8].

Компанія Covidien, а зараз вже Medtronic plc пропонує апарати ValiLab™, що реалізують технологію LigaSure™ [9]. Технологія LigaSure – це технологія біполярного перекриття судин за допомогою ВЧ струму. Програма зворотного зв'язку яка використовується для регулювання дози прикладеної енергії, залежить від об'єму тканини, щільності судин та реалізує обмеження тепла, що виділяється в цільовій тканині. Як запевняють розробники [10], технологія LigaSure™, що заснована на енергетичних платформах

ValleyLab™, продовжує залишатися найпередовішою технологією заварювання та дисекції судин у світі.

Розробники гарантують, що:

- за одну секунду LigaSure™ 434000 разів вимірює імпеданс тканин, обчислює та регулює рівень поданої енергії за допомогою унікального алгоритму;

- протягом двох секунд LigaSure™ надійно та стабільно перекриває судини діаметром до 7 мм, які витримують 3-кратний нормальний систолічний тиск;

- за три секунди хірург, який використовує технологію LigaSure™, може запечатати судину, розсікти її та безпечно перейти до наступної частини процедури завдяки швидшому часу охолодження (до  $< 60^\circ$  менше ніж за одну секунду), що досягається крім усього також використанням унікального нанопокриття.

Слід зазначити, що порівняльні випробування, які відбулися в березні 2018 р. за участі авторів в центрі Medtronic в Шанхаї, показали, що вітчизняна технологія перекриття судин, реалізована на апаратах ЕКВ3-300 «Патонмед™» не поступається технології LigaSure™.

В якості прикладу, обладнання цієї фірми можна навести апарат ValleyLab™ FT10 (рис. 3), в якому реалізовані технології LigaSure™ [12].

Як запевняють розробники [11], цей пристрій забезпечує:

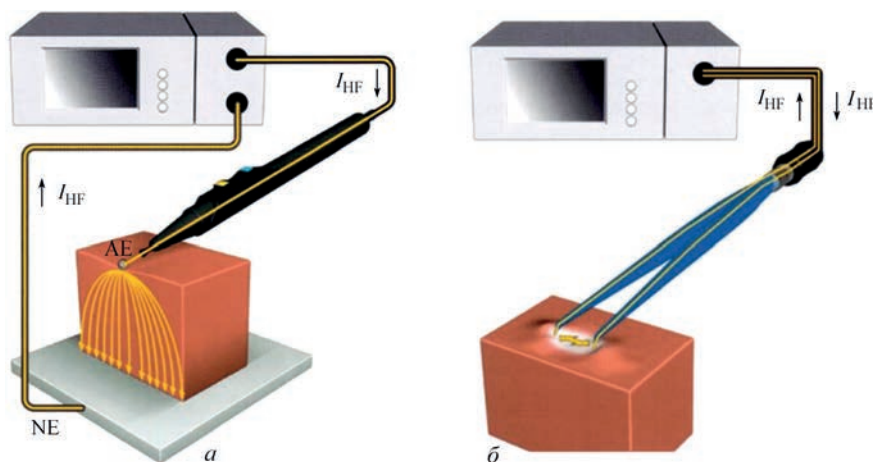


Рис. 2. Проходження струму при монополярній (*a*) та біполярній (*б*) схемах





Рис. 3. Зовнішній вигляд апарата ValleyLab™ FT10

- поліпшену ефективність системи електролігування LigaSure™;
- система TissueFect™ сканує опір тканини та адаптує характеристики енергії, що подається з частотою 434 кГц;
- автоматичне розпізнавання інструменту та автоматична адаптація потужності мінімізує час налаштування апарата перед та під час операції;
- один сенсорний екран зі спрощеним управлінням;
- підключення до Інтернету та ексклюзивна система оновлення програмного забезпечення Valleylab™ Exchange;
- унікальний режим Valleylab™ для покращеної дисекції з гемостазом;
- адаптивна система REM™ (система стеження за нейтральним електродом пацієнта);
- режим Автобіполяр, режим М'яка коагуляція;
- вага 10,1 кг;
- габарити 368×462×178 мм.

Прикладом більш доступного та компактно-го приладу цієї фірми є апарат Valleylab™ LS10 (рис. 4) [12], призначений для перекриття судин. При вазі 5,5 кг він має габарити 300×377×105 мм та легко транспортується. Забезпечує швидке (за 2...4 с) заварювання судин діаметром до 7 мм. Використовує оптимальні характеристики енергії для досягнення заварювання судин та масивів тканин з мінімальним розповсюдженням тепла. Апарат має спрощену панель керування з однією кнопкою «on/off» та одне гніздо підключення інструмента за принципом «підключай та працюй». Апарат ви-



Рис. 4. Зовнішній вигляд апарата Valleylab™ LS10

значає, який інструмент підключено в даний час та автоматично налаштовує робочі параметри приладу для швидкого та стабільного результату перекриття судин.

Більш складним багато функціональним приладом фірми є апарат (Енергетична платформа) ForceTriad™ (рис. 5) [13, 14].

Це повнофункціональна електрохірургічна система, яка забезпечує електрохірургічне різання, коагуляцію та біполярну герметизацію судин в одному генераторі LigaSure™.

Енергетична платформа цього апарату призначена для відкритих та лапароскопічних хірургічних процедур і включає:

- технологію зондування TissueFect™ для всіх типів тканин;
- режим Valleylab™ для електрохірургії;
- технологія перекриття LigaSure™ для герметизації судин.

Як запевняють розробники [14, 15], енергетична платформа ForceTriad™ – єдина в галузі повнофункціональна енергетична платформа з можливостями дистанційного оновлення програмного забезпечення. Використовуючи систему оновлення програмного забезпечення Valleylab™ Exchange, пристрій можна легко оновити на місці, надаючи хірургам, медсестрам і пацієнтам можливість найсучасної технології.

Сенсорна технологія TissueFect™ – це система контролю Covidien, призначена для точного управління постачанням енергії, створюючи низку варіантів для бажаного ефекту впливу на тканину.

Покращена технологія зварювання тканин LigaSure™ з'єднує судини діаметром до 7 мм включно, та пучки тканин.

Біполярна резекція з програмованим додаванням фізіологічного розчину дозволяє хірургам виконувати різноманітні урологічні та гінекологічні процедури в солоному середовищі.

В апараті реалізовано автоматичне розпізнавання інструменту. Пристрій, побудований за принципом «все в одному» сумісний зі звичайними електрохірургічними інструментами та всіма поточними та новими інструментами LigaSure™.

Цикли зварювання є швидшими, ніж у оригінального генератора при герметизації судин LigaSure™. Режим Valleylab™ забезпечує уні-



Рис. 5. Зовнішній вигляд апарата ForceTriad™

кальну комбінацію монополярного гемостазу та дисекції.

Компанія Ethicon, яка входить до складу такого гіганту як корпорація Johnson&Johnson [15], продукція якої відома в усьому світі, представлена на ринку зварювальних електрокоагуляторів апаратом MEGADYNE™ [16] (рис. 6). Як заявляють розробники, завдяки оптимізованому зручному дизайну та оптимізованій подачі енергії, електро-хірургічний генератор MEGADYNE™ є простим, але розумним вибором серед монополярних і біполярних джерел живлення для виконання різноманітних медичних операцій.

Цей пристрій, що передбачає роботу в монополярному та біполярному режимах, має великий дисплей, які легко читаються, та інтуїтивно зрозумілий режим налаштування потужності. В ньому є візуальна індикація протікання робочого струму. Є також послуга виклик останнього використовуваного режиму. Великий яскравий дисплей. Вага генератора 7,7 кг. Габарити 368×439×179 мм.

Корпорація KLS Martin Group (Німеччина, США), має свої відділення та представництва по всьому світу, пропонує на ринок чисельне медичне обладнання та інструментарій, включаючи електро-хірургічне для гемостазу та перекриття судин [17–21]. Серед такого обладнання зупинимось на їх новітній розробці – апараті maXium® Smart C (рис. 7).

Як запевняють розробники [21], електрохірургічний апарат maXium smart C поєднує перевірений інтерфейс користувача maXium® з ефектом налаштування потужності maXium®, який використовується при коагуляції, чим досягається максимальна продуктивність у всіх діапазонах потужності.



Рис. 6. Електрохірургічний генератор MEGADYNE™



Рис. 7. Зовнішній вигляд апарата maXium® smart C [21]

Використана в даному пристрої біполярна система герметизації судин SealSafe® IQ дозволяє ефективно герметизувати судини або пучки тканин без будь-якої необхідності попередньої підготовки або детального оголення тканини, яку потрібно герметизувати. Завдяки програмі забезпечення точного струму SealSafe® IQ, спеціально адаптованого до такого типу застосування та спеціальних інструментів, герметизується лише тканина, розташована між губками інструменту. В результаті бічні термічні пошкодження навколишніх тканин зменшуються.

Апарат maXium® smart C доступний у трьох версіях, та має: інформативний екран, пам'ять на попередні налаштування (до 500 слів пам'яті), безперервне відображення основних параметрів приладу.

На додаток до високочастотної частини апарати maXium® smart C можуть бути поєднані з системою подачі аргону для рішення проблем, пов'язаних з розширеною поверхневою кровотечею в паренхіматозних тканинах, з якою важко впоратися за допомогою класичної коагуляції. Таким чином, на думку розробників, аргонно-плазмова коагуляція є ідеальним доповненням до звичайних ВЧ методів.

У поєднанні з серією maXium® smart Line, має ще: систему для забезпечення ефективного гемостазу, та може використовуватися кількома способами; систему maXium® Veamer, яка при проведенні операцій зменшує карбонізацію тканин і, таким чином, прискорюється процес загоєння ран. Завдяки низькій глибині проникнення ВЧ струму також значно знижується ризик перфорації.

Компанія Vowa medical [22] є провідним постачальником повного спектра інноваційних енергетичних хірургічних систем виробництва Німеччини. Як заявляють розробники [22], продукти та системи ідеально адаптовані до вимог повсякденного медичного обслуговування в лікарнях і вражають своєю високою гнучкістю та безпекою. На відміну від лідерів глобального ринку портфель продукції компанії BOWA невеликий, але сфокусований на електрохірургії. А цільові ринки – це Європейський Союз (переважно Німеччина), країни східної Європи, країни Азії, країни СНД та Україна.

Серед приладів, які випускає компанія Vowa medical, розглянемо апарати серії ARC (рис. 8).



Рис. 8. Апарат серії ARC





Рис. 9. Лицьова панель апарату ARC з різною кількістю роз'ємів



Рис. 10. Зовнішній вигляд апарату ECONT-0201.2



Рис. 11. Зовнішній вигляд апарату ECONT-0201.3 разом із аргонною станцією

Ця серія складається з декількох модифікацій, які відрізняються між собою за максимальною вихідною потужністю (від 100 до 400 Вт) та функціональними можливостями.

Так апарат ARC100 має максимальну потужність 100 Вт та комплектується медичними інструментами, розрахованими на цю потужність (пінцетами та монополярними скальпелями).

Більш потужні апарати, наприклад ARC400, мають більший функціонал та комплектуються інструментами, розрахованими на потужність 400 Вт (затискачі з розміром до 280 мм, спеціальні інструменти ERG310, Night NIFF, LIGATOR, біполярні ножиці тощо). Вихідні потужності та програмне забезпечення дозволяє використовувати ці апарати в хірургії, гінекології та урології [22].

В апаратах серії ARC реалізовані такі зручні функції: діалогове керування та адаптивний дисплей; зняття інформації з апарату та оновлення програмного забезпечення за допомогою програм, які записані на USB-носіях. Це значно полегшує



Рис. 12. Зовнішній вигляд апарату «Надія 4» ЕКВЧ-300

повсякденну роботу персоналу лікарні. Нове покоління ARC просте в обслуговуванні. Доступні 5 варіантів конфігурації в залежності від вимог до операційного втручання. Кількість роз'ємів (монополяр або біполяр) варіюються від одного до двох кожного (рис. 9).

В апараті існує функція COMFORT для автоматичного розпізнавання інструментів та контролю циклів використання. Програма «Майстер налаштувань» у діалоговому режимі допомагає створювати та оптимізувати конфігурацію апарату ARC.

Максимальна потужність в режимі MONOPOLAR – 400 Вт (на 200 Ом), а в режимі BIPOLAR – 200 Вт (на 75 Ом). Вага 12,5 кг. Габарити 430×140×470 мм

**Українські компанії.** Компанія «Контакт», що базується у м. Київ, присутня на ринку високотехнологічного ендоскопічного обладнання для малоінвазивної хірургії починаючи з 2001 р. [23]. Компанія розробляє і виробляє ендоскопічні апарати і системи для лапароскопії, артроскопії, риноскопії, торакоскопії, гінекології та урології. Компанія має в своєму здобутку наступні апарати: електрохірургічні апарати ECONT-0201.1, ECONT-0201.2 (рис. 10) та ECONT-0201.3 (рис. 11), який позиціонується розробниками як сучасна електрохірургічна система експертного класу [23].

Ці багатофункціональні апарати мають максимальну вихідну потужність до 300 Вт.

Ось деякі із заявлених розробниками особливостей та переваг системи ECONT-0201.3.

Особливості системи ECONT-0201.3: два монополярні канали; один біполярний канал; кольоровий дисплей TFT; система контролю ланцюга



Рис. 13. Зовнішній вигляд апарату EKV3-300

## ЗВАРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

нейтрального електрода (ANECS); широкий набір сучасних режимів електрохірургії; інтерактивна візуальна система допомоги під час роботи (InViNS help); постійний самоконтроль критич-

них систем (ART-SCS); 100 наборів режимів (програма), що запам'ятовуються.

Переваги системи ЕКОНТ-0201.3: спеціальні режими аргано-плазмової коагуляції (АПК) для загальної хірургії, лапароскопії та гнучкої ендоскопії з підтримкою аргано-плазмового розряду починаючи з 5 Вт та відстанями до оброблюваної тканини до 15 мм; спеціальні моно- та біполярні режими для артроскопії; спеціальні моно- та біполярні режими для урології та гінекології; повністю автоматична система зварювання судин; спеціальні режими для поліпектомії/папілотомії [23].

Нижче наведені деякі основні режими для біполярного різання, коагуляції та зварювання.



Рис. 14. Зовнішній вигляд мобільної версії апарату ЕКВ3-300 в транспортному (а) та робочому (б) положенні



Рис. 15. Зовнішній вигляд апарату ЕКВ3-300-2

Таблиця. Порівняльні технічні характеристики електрохірургічних апаратів «Надія 4»

Максимальна потужність у режимах	ЕХВЧ-300РК	ЕХВЧ-300 Модель-200	ЕХВЧ-200			ЕХВЧ-120	
			Модель-200РХ	Модель-120	Модель-120РХ/1,76	Модель-120РХ/3,5	
Монополярне різання-1	300 Вт	300 Вт	200 Вт	200 Вт	120 Вт	120 Вт	120 Вт
Монополярне різання-2 (змішане)	200 Вт	200 Вт	200 Вт	200 Вт	120 Вт	120 Вт	120 Вт
Біполярне різання-1	300 Вт	–	–	–	–	–	–
Біполярне різання-2 (перекриття)	300 Вт	–	–	–	–	–	–
Монополярна коагуляція-М	–	200 Вт	120 Вт	120 Вт	120 Вт	120 Вт	120 Вт
Монополярна коагуляція-М1	250 Вт	–	–	–	–	–	–
Монополярна коагуляція-М (форсована)	120 Вт	–	–	–	–	–	–
Біполярна коагуляція Б	–	120 Вт	120 Вт	120 Вт	120 Вт	120 Вт	120 Вт
Біполярна коагуляція Б1	120 Вт	–	–	–	–	–	–
Біполярна коагуляція Б2 (з підвищеним опором тканин)	120 Вт	–	–	–	–	–	–
Потужність споживання	600 Вт	600 Вт	450 Вт	450 Вт	450 Вт	300 Вт	300 Вт
Робоча частота	440 кГц	440 кГц	440 кГц	1,76 МГц	440 кГц	1,76 МГц	3,5 МГц
Габаритні розміри:							
електронний блок				(290×215×125) мм			
педаць управління				(230×195×45) мм			
Вага комплексу	<6 кг		<4,5 кг				



Біполярне різання/(гемостаз 0...7 мм), 100 Вт. Біполярна коагуляція: мікро – 60 Вт, 100 Ом; стандартна – 100 Вт, 100 Ом; авто – 300 Вт, 20 Ом. Зварювання судин: лапароскопічний інструмент 5 мм – 100 Вт, 20 Ом; лапароскопічний інструмент 10 мм – 300 Вт, 20 Ом; загальна хірургія – 300 Вт, 20 Ом.

Загальні характеристики: робоча частота 440 кГц, напруга живлення 220 В, споживана потужність 690 Вт, вага 8,0 кг, габарити 350×140×350 мм.

ТОВ МНВК «Науково-дослідний інститут прикладної електроніки» м. Київ, представлене на вітчизняному ринку електрохірургічними апаратами під назвою «Надія 4» [24]. На сьогодні це ціла лінійка апаратів, що відрізняються як потужністю, так і своїми технологічними можливостями наведеними в таблиці. Як видно із представлених матеріалів, хоч розробники і не позиціонують дані апарати як зварювальні, вони значною мірою відповідають необхідним вимогам, що слугує основою для включення даного обладнання в цей огляд. Слід відзначити, що наряду з апаратами з робочою частотою 440 кГц, яка може вважатися стандартною для такого роду апаратури, представлені апарати, що працюють на частоті 1,76 МГц та, навіть 3,5 МГц. Зовнішній вигляд апарату «Надія 4» представлено на рис. 12.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) м. Київ представляє на вітчизняному ринку електрохірургічні апарати під торговою маркою «Патонмед™». На сьогодні ІЕЗ представлений апаратом ЕКВЗ-300 (електрокоагулятор високочастотний зварювальний). Цей прилад, базова конструкція якого була розроблена в 2010–2011 рр., успішно використовується в медичній практиці України починаючи з 2012 р. в багатьох спеціальностях: від абдомінальної хірургії до офтальмології.

Особливістю його конструкції є багатофункціональність, яка забезпечується можливістю програмування під особливості застосування в медицині чи ветеринарії, а також під потреби конкретного користувача (хірурга).

Функціональна схема ЕКВЗ-300 забезпечує роботу в режимах: біполярного різання, ручного зварювання – керованої хірургом імпульсної коагуляції, та автоматичного зварювання.

Предбачена можливість одночасного підключення двох інструментів з перемиканням між ними та одномоментної роботи ними в режимі однієї керівної педалі.

Робоча частота апарата ЕКВЗ-300 «Патонмед» – 440 кГц, максимальна вихідна потужність 300 Вт. Вага 7,5кг. Габарити 410×400×130 мм.

З часу його розробки цей апарат постійно удосконалюється (рис. 13) [25]. На сьогодні він має велику різноманітність алгоритмів роботи та пара-

метрів роботи залежно від типу операції, яку потрібно виконати. В цьому апараті можлива адаптація, коригування та завантаження додаткових програм за бажанням користувача. Предбачена можливість запам'ятовування та використання «улюблених» програм та алгоритмів. Можливо використання інструментів інших виробників.

Алгоритм роботи сучасних апаратів ЕКВЗ-300, що досить детально висвітлений в патенті [25, 26], та відповідне оригінальне програмне забезпечення гарантує надійне виконання необхідних задач при зварюванні живих тканин.

Крім стаціонарного варіанту була розроблена його мобільна (рис. 14) та інші модифікації. Мобільна версія, яка має такі самі технічні характеристики що і стаціонарна, зручна при необхідності частого транспортування апарату та при роботі поза стаціонарної операційної, наприклад, у ветеринарії.

Подальшим розвитком цієї серії є апарат ЕКВЗ-300-2 «Патонмед™», в якому реалізовані новітні алгоритми зварювання, що ґрунтуються на багаторівневих зворотніх зв'язках. Завдяки цьому є поетапна оцінка якості тканини, що зварюється, і регулюється подача потужності (рис. 15). Це забезпечує покращені функціональні показники з'єднання тканин. Даний прилад має великий рідиннокристалічний дисплей. У цьому апараті реалізовано функцію розпізнавання підключеного інструменту, та автоматичної зміни параметрів та алгоритмів роботи, згідно з особливостями підключеного інструменту. Має вбудовану систему самоконтролю та активації підказок хірургу. Контролює справність підключеного до апарату інструменту. Має можливість візуалізації змін параметрів тканини в процесі з'єднання, що дозволяє проводити наукові дослідження та мати зворотній зв'язок по якості з'єднання.

Слід зазначити, що в рамках однієї статті неможливо висвітлити всю гаму обладнання для такої перспективної галузі як зварювання живих тканин у медицині та ветеринарії. Автори представили найбільш характерні зразки.

## Висновки

1. Велика кількість моделей свідчить про гостру конкурентну боротьбу на ринку електрохірургічної апаратури, яка вже стала звичною.

2. Всі без винятку розглянуті апарати мають близькі заявлені технічні характеристики, які зумовлені вимогами до технічних параметрів медичної радіочастотної апаратури, впливу і відрізняються в основному ергономікою, конструктивним виконанням та притаманними їм функціями.

3. Більшість апаратів поєднують в собі можливості працювати як по біполярній, так і по моно-

полярній схемам. Використання монополярного інструменту зумовлене популярністю та звичністю для хірурга тонкого швидкого ріжучого впливу такого інструменту.

4. У деяких апаратах високочастотний блок об'єднаний з іншими технологічними блоками, наприклад, аргано-плазмовим або блоком для конвекційно-інфрачервоною обробки тканин, з орієнтуванням на спеціалізовані галузі хірургії, де є вимога потужного впливу по площі на невелику глибину (наприклад, хірургія печінки).

5. Всі виробники прагнуть досягнути максимальної автоматизації процесу, зводячи до мінімуму вплив виконавця на оцінку внутрішніх характеристик тканини. Принцип використання полягає у залученні хірурга до правильного вибору режиму та інструменту відповідно до встановлених виробником умов використання в хірургії. У той же час, оцінку стану тканини в процесі її обробки та дозування впливу на неї покладають на алгоритми апаратів.

6. Розроблені ІЕЗ ім. Є.О. Патона апарати серії ЕКВЗ-300 за своїми технічними характеристиками повністю відповідають кращим світовим стандартам.

7. У функціонал розроблених ІЕЗ ім. Є.О. Патона електрозварювальних апаратах серії ЕКВЗ-300 закладені програми, створені на основі результатів розробок українських дослідників, лікарів у галузях абдомінальної хірургії, торакальної хірургії, проктології, офтальмології, нейрохірургії, онкології та гінекології.

## Список літератури/References

1. Патон Б.Е., Иванова О.Н. (2009) *Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия*. Атлас. Киев, Междунар. ассоциация «Сварка».
2. Paton, B.E., Ivanova, O.N. (2009) *Tissue-saving high-frequency electric welding surgery*. Atlas. Kyiv, IAW [in Russian].
3. Podpriatov, S.S., Podpriyatov, S.E., Marynsky, G.S. et al. (2022) The experimental biologic and structural grounds of clinical advantages for next-generation, sutureless, bio-welded gut anastomosis. In: *17th Int. Conf. of Colonoproctologists ESC22ABS-1742 (Dublin, Ireland, 21-23 September 2022)*.
4. Пасечникова Н.В., Науменко В.А., Уманец Н.Н. (2011) Наш опыт применения способа высокочастотной электросварки биологических тканей в ходе эндовитреальных вмешательств. *Сварка мягких живых тканей. Современное состояние и перспективы развития: Материалы шестого междунар. семинара, 2-3 дек. 2011 г., Киев, ИЭС им. Е.О. Патона*. Pasechnikova, N.V., Naumenko, V.A., Umanets, N.N. (2011) Our experience of application of high-frequency electric welding of live tissues during endovitrebral interventions. In: *Proc. of 6th Int. Seminar on Welding of Soft Live Tissues. State-of-the-Art and Prospects of Development (Ukraine, Kyiv, 2-3 December 2011)*.
5. Messenger, D., Carter, F., Noble, E. et al. (2020) Electrosurgery and energized dissection. *Surgery (Oxford)*, 38(3), 133–138. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.mpsur.2020.01.006>
6. *Electrosurgical Generators Market Share 2025. Growth Analysis. Global Market Insights Inc.* <https://www.gminsights.com/industry-analysis/electrosurgical-generators-market>.
7. *Electrosurgical device market share by company globally 2016. Statista.* <https://www.statista.com/statistics/909626/electrosurgical-devices-market-share-by-top-company>.
8. *Engineering the Extraordinary. Medtronic.* <https://www.medtronic.com/uk-en/index.html>.
9. *LigaSure™ Technology. Medtronic.* <https://www.medtronic.com/covidien/en-us/products/vessel-sealing/ligasure-technology.html>.
10. *LigaSure™ 123. Medtronic.* [https://www.medtronic.com/covidien/en-gb/products/vessel-sealing/ligasure-123.html?cid=PPC:GOOG:branded:UK\\_EN\\_SI\\_LigaSureTechnology12](https://www.medtronic.com/covidien/en-gb/products/vessel-sealing/ligasure-123.html?cid=PPC:GOOG:branded:UK_EN_SI_LigaSureTechnology12).
11. *Energy product catalogue.* <https://asiapac.medtronic.com/content/dam/covidien/library/emea/en/product/electrosurgical-hardware-and-accessories/weu-energy-catalogue-2020.pdf>.
12. *Valleylab™ LS10 Generator. Medtronic (UK).* <https://www.medtronic.com/covidien/en-gb/products/electrosurgical-hardware/valleylab-ls10-generator.html>.
13. *ForceTriad™ Energy Platform. Medtronic Animal Health.* <https://www.medtronic.com/animal-health/en-us/products/electrosurgical-hardware/forcetriad-energy-platform.html>.
14. *Коагулятор Medtronic Force Triad. Medicalstore.* <https://medicalstore.com.ua/product/medtronic-force-triad>. *Coagulator Medtronic Force Triad. Medicalstore.* <https://medicalstore.com.ua/product/medtronic-force-triad>.
15. *Johnson & Johnson. Content Lab U.S.* <https://www.jnj.com>.
16. *MEGADYNE™ Electrosurgical Generator. Ethicon, a Johnson & Johnson MedTech Company.* <https://www.jnjmedtech.com/en-US/product/megadyne-mega-power-electrosurgical-generator>.
17. *Electrosurgery. KLS Martin. Surgical Innovation is our Passion.* <https://www.klsmartin.com/en/products/electrosurgery/>.
18. *Electrosurgery. KLS Martin. Surgical Innovation is our Passion.* <https://www.klsmartin.com/en/products/electrosurgery/#c4014>.
19. *Electrosurgery. KLS Martin. Surgical Innovation is our Passion.* <https://www.klsmartin.com/en/products/electrosurgery/#c4009>.
20. *Electrosurgery unit maxium®. KLS Martin. Surgical Innovation is our Passion.* <https://www.klsmartin.com/en/products/electrosurgery/electrosurgery-units/major-electrosurgery-units/maxium/>.
21. *BOWA MEDICAL Electrosurgery.* <https://www.bowa-medical.com/?lang=en#gref>.
22. *The new ARC generation BOWA MEDICAL.* <https://www.arc-electrosurgery.com/en/>.
23. *Система электрохирургическая, продвинутая модель. Contact Co.* <https://contact-endoscopy.com/ru/electrosurgical-system/>. *Electrosurgical system, advanced model [in Russian]. Contact Co.* <https://contact-endoscopy.com/ru/electrosurgical-system/>.
24. *Надія-4. Апарат високочастотний електрохірургічний.* <http://www.xn--4-6kcq7b0g0b.com.ua>. *Nadiya-4. High-frequency electrosurgical unit [in Ukrainian].* <http://www.xn--4-6kcq7b0g0b.com.ua>.
25. Ткаченко В.А., Маринський Г.С., Подприатов С.Є. та ін. (2022) *Електрокоагулятор високочастотний зварювальний ЕКВЗ-300 «Патонмед»*. Патент України на корисну модель № 151770, МПК А61В18/12(2006.01) Опубл. 14.09.2022, бюл. № 37/2022. Tkachenko, V.A., Marynskyi, G.S., Podpriyatov, S.E. et al. (2022) *High-frequency welding electrocoagulator EKVZ «Patonmed»*. Pat. Ukraine on utility model 151770, Int. Cl. A61B18/12(2006.01), Publ. 14.09.2022 [in Ukrainian].
26. Патон Б.Е., Ткаченко В.А., Маринський Г.С. та ін. (2014) *Спосіб з'єднання зварюванням біологічних тканин людей і тварин з використанням високочастотного струму*. Патент України № 106513. Опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17/2014. Paton, B.E., Tkachenko, V.A., Marynsky, G.S. et al. (2014) *Method of joining by welding of human and animal biological tissues using high-frequency current*. Pat. Ukraine 106513, Publ. 10.09.2014 [in Ukrainian].



## HIGH-FREQUENCY EQUIPMENT FOR LIVE TISSUE WELDING (Review)

G.S. Marynskyi<sup>1</sup>, V.A. Tkachenko<sup>1</sup>, V.O. Bysko<sup>1</sup>, S.E. Podpryatov<sup>1,2</sup>, S.S. Podpryatov<sup>1,2</sup>, S.D. Grabovskiy<sup>1</sup>, S.V. Tkachenko<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Kyiv City Clinical Hospital No. 1. 121 Kharkyvske Hwy, 02091, Kyiv, Ukraine. E-mail: kcrz@ukr.net

Technology and equipment for high-frequency welding and treatment (coagulation, cutting) of live tissues in surgery is ever wider used in medical practice of many countries of the world. This work, which has been performed on the base of both the materials posted on the Internet and authors' own materials, is a general review of the most typical representatives of such basic equipment, which is proposed by the leading world manufacturers. The main features and advantages of the respective equipment are given as claimed by its developers. The work is designed both for users and for developers of new equipment. 26 Ref., 1 Tabl., 15 Fig.

*Keywords: electric welding surgery, high-frequency welding of live tissues, equipment, world manufacturers*

Надійшла до редакції 12.12.2022

## ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ВИРОБНИЦТВО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТУ

У 2018 р. засновано R&D центр, який об'єднав компетенції ПрАТ «ПлазмаТек» та Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. Задача центру – створення конкурентних інноваційних розробок і технологічних рішень та забезпечення промисловості принципово новими методами виробництва. Технологічним ядром центру є обробка матеріалу високоенергетичним пучком електронів. В результаті проведених фізичних експериментів виявлено, що високоенергетичний пучок електронів – ефективний інструмент для роботи з тугоплавкими металами W, Mo, Ti, Co та карбідами на їх основі.

У вересні 2022 р. було введено в експлуатацію промислову лінію по виробництву твердосплавного інструменту за моделлю кругової економіки, в якому технології та обладнання створені українськими інженерами. В результаті цього, на сьогодні в компанії ПрАТ «ПлазмаТек» є можливість виробництва промислових партій твердосплавного інструменту. Промислова технологія повного циклу відновлення використаних і виробництва нових деталей на основі твердого сплаву WC-Co включає: унікальні проміжні технології відновлення і синтезу субмікронних і мікронних порошоків WC; прецизійне пресування і високошвидкісне електронно-променево спікання напівфабрикатів. Робота наукового центру побудована на переробці вживаної сировини, яка в подальшому проходить обробку для перетворення у вхідний порошок потрібних параметрів.

Дослідні партії деталей – волочильних фільтер та ножів для рубки дроту – пройшли промислові випробування в умовах серійного виробництва зварювальних матеріалів і продемонстрували високий рівень конкурентоспроможності з продуктами фірм – лідерів галузі. Сьогодні в постійному виробництві: фільтера волочильна, ніж рубочний, ролик металургійний, заготовка для виготовлення фрез та свердл.



## МЕТОДИ ЗАПОБІГАННЯ ЕФЕКТУ ЕКРАНУВАННЯ НАПРУЖЕНЬ В СИСТЕМІ ІМПЛАНТАТ–КІСТКА (Огляд)

А.В. Молтасов<sup>1</sup>, С.Г. Войнарович<sup>1</sup>, М.М. Димань<sup>1</sup>, С.М. Калюжний<sup>1</sup>, С.В. Бурбурська<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>OSTEONIKA Limited Liability Company. 79026. м. Львів, вул. Стрийська, 98. E-mail: ito3dlab@gmail.com

Статистичні дані багатьох національних реєстрів та медичних співтовариств свідчать про те, що асептична нестабільність протеза кульшового суглоба є однією з основних перепон на шляху до використання ортопедичних імплантатів. Однією з причин асептичної нестабільності є виникнення ефекту екранування напружень, який зумовлений невідповідністю модулів пружності імплантату та кісткової тканини. Розглянуто методи, які дозволяють знизити модуль пружності металевих імплантатів з наближенням його до відповідності модуля пружності кісткової тканини. Встановлено, що досягнення поставленої задачі шляхом заміни традиційних металів, що використовуються для виготовлення імплантатів, сплавами зі значно нижчим модулем пружності є технологічно невирішеним завданням при їх масовому виробництві. Проаналізовано найбільш розповсюджені на сьогодні методи зниження модуля пружності ортопедичних імплантатів, вказано їхні переваги та недоліки. Найбільш вагомою проблемою масового використання передових технологій адитивних технологій у виробництві імплантатів є їхня праце- і матеріаломісткість. Встановлено, що використання технологій модифікації поверхні, зокрема плазмових методів нанесення пористих покриттів, є найбільш доступним та ефективним методом зменшення модуля пружності поверхні імплантату, контактуючого з кісткою, зі значною вірогідністю зниження виникнення ефекту екранування напружень. Бібліогр. 53, рис. 8.

*Ключові слова:* ортопедичний імплантат, титанові сплави, модуль пружності, пористі покриття, модифікація поверхні

**Вступ.** Масова комерціалізація та технологічні досягнення кількох останніх десятиліть змінили динаміку суспільства в бік більш сидячого способу життя, що пов'язано з підвищеним індексом маси тіла, який згубно впливає на стан опорно-рухового апарата [1] та призводить до багатьох захворювань, включаючи остеоартрит кульшових та колінних суглобів [2]. Станом на 2014 р. від остеоартриту страждало до 15 % населення планети [3]. З огляду на глобальне старіння населення та зміну способу життя вчені прогнозують, що в майбутньому все більше людей страждатимуть від ортопедичних захворювань [4].

Проте коли фізіотерапія та терапевтичне лікування вже не можуть покращити стан хворого, то для зменшення больового відчуття і відновлення функціональності суглоба використовують ендопротезування, тобто заміну суглоба ортопедичним імплантатом шляхом хірургічного втручання. Це дозволяє пацієнтам повернутися до якісного життя, а попит на ортопедичні імплантати зростає невіддільно з інтенсивним розвитком технологій імплантації [5].

Сучасні технології виготовлення ендопротезів дозволяють отримувати як стандартні імплантати (рис. 1, в), так й індивідуальні, тобто сформовані з урахуванням усіх дефектів кістки конкретного пацієнта (рис. 1, г) [6], зі забезпеченням пористої або трабекулярної структури поверхні. Однак збіль-

шення випадків захворюваності молодих людей зумовило необхідність помітного підвищення термінів експлуатації ендопротезів. Фактично у більш молодих пацієнтів зі зайвою вагою, яким необхідна заміна кульшового суглоба, може виникнути необхідність в тому, щоб їх протез пропрацював 50 і більше років [7]. При цьому в роботі [8] зроблено припущення, що тільки 58 % пацієнтів можуть розраховувати на безвідмовну експлуатацію штучного кульшового суглоба протягом хоча б 25 років.

Однією з основних причин відмови імплантату є його асептичне розхитування через зниження щільності кісткової тканини, що викликано недостатнім навантаженням, яке діє на оточуючу ендопротез кістку, оскільки кісткова тканина утворюється та закріплюється в напрямку ліній дії механічних напружень [9]. В літературі таке явище називають «екрануванням напружень» (Stress shielding), виникнення якого зумовлене тим, що при виготовленні імплантатів використовують метали і сплави, модуль пружності яких значно перевищує відповідну характеристику кісткової тканини, що призводить до виникнення дотичних напружень в зоні контакту між кісткою та її замінником [10].

Серед металічних матеріалів біомедичного призначення найбільшого поширення набули титан та його сплави через виняткову біосумісність, відмінну корозійну стійкість та низьку питому

Молтасов А.В. – Scopus Author ID 55607746800, Войнарович С.Г. – Scopus Author ID 57200257480,

Димань М.М. – Scopus Author ID 57209205322, Калюжний С.М. – Scopus Author ID 57276754500,

Бурбурська С.В. – Scopus Author ID 57226147508

© А.В. Молтасов, С.Г. Войнарович, М.М. Димань, С.М. Калюжний, С.В. Бурбурська, 2023



вагу в поєднанні з високими механічними характеристиками [11]. Одним з найбільш поширених матеріалів, що застосовується для виготовлення заміників високонавантажених суглобів таких, як кульшові, колінні й плечові, є  $(\alpha+\beta)$ -титановий сплав Ti6Al4V (BT6) [13]. Високі показники механічні властивості він має завдяки таким легуючим компонентам, як алюміній, який значно зміцнює  $\alpha$ -фазу і зменшує густину сплаву, а також ізоморфного  $\beta$ -стабілізатора, як ванадій, який дозволяє досягнути значного зміцнення зі збереженням достатньої пластичності [14]. Однак, не зважаючи на високі показники механічної міцності та зносостійкості, терміни експлуатації будь-яких металічних імплантатів, жорсткозафіксованих в кістковій тканині, суттєво обмежені через невідповідність модулів пружності кісткової тканини і матеріалу імплантату.

Ефект екранування напружень уповільнює процеси відновлення форми та загоєння кістки, яке знижує щільність кісткової тканини із збільшенням її пористості [11], що може спровокувати відмову у функціонуванні імплантату, а саме нестабільність фіксації імплантату в кістці через її структурні зміни. Нестабільність ендопротезу призводить до збільшення дефектності кістки та вимагає повторного, тобто ревізійного оперативного втручання. При цьому ревізійні операції є небажаними, оскільки мають високу вартість та вищий ризик післяопераційних ускладнень. Тому пошук шляхів підвищення терміну експлуатації

ендопротезів на сьогодні є актуальною задачею не лише в галузі медицини, а й в матеріалознавстві та механічній біоінженерії.

**Матеріали та методи.** Найбільш розповсюдженими методами запобігання екрануванню напружень є застосування низькомодульних сплавів, надання імплантатам пористої структури та застосування імплантатів з функціонально-градієнтними покриттями різної пористості.

Сучасні тенденції руху до низькомодульних матеріалів призвели до розробки нових сплавів із кращим співвідношенням модулів пружності кістка-імплантат. Так, основний найбільш поширений  $(\alpha+\beta)$ -титановий сплав Ti6Al4V намагаються замінити на  $\beta$ -титанові сплави, леговані ніобієм, цирконієм і танталом (Ti13Nb13Zr, Ti29Nb13Ta4,6Zr), модуль пружності яких може бути нижче 50 ГПа [16]. При цьому значення модуля пружності кортикальної кісткової тканини змінюється від 5 до 23 ГПа, а для таких найбільш розповсюджених матеріалів, з яких виготовляють імплантати, як титановий сплав Ti6Al4V, нержавіюча сталь 316L та кобальт-хромовий сплав CoCrMo ця характеристика становить приблизно від 112 до 240 ГПа відповідно (рис. 2).

Нещодавні результати розробки сплаву Ti35Nb7Zr6Ta, модуль пружності якого був наближений до модуля пружності кортикальної кісткової тканини з метою запобігання її резорбції, виявилися успішними [17]. Однак  $\beta$ -фазні сплави мають нижчу міцність, ніж сплави із  $\alpha$ - та  $\alpha+\beta$ -фазами, а



Рис. 1. Загальний вигляд ендопротезування: а – проксимальна частина стегнової кістки (1 – голівка стегнової кістки; 2, 3 – відповідно голівка і ніжка ендопротеза); б – система стегнова кістка – ендопротез – тазова кістка; в – стандартні ендопротези; г – макет та рентгенограма індивідуального ендопротеза після імплантації

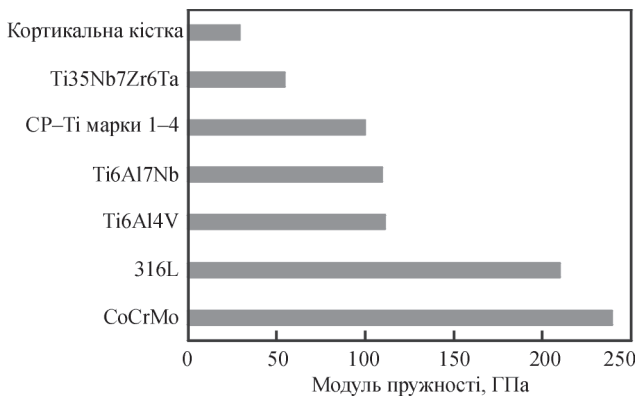


Рис. 2. Модулі пружності металічних матеріалів для імплантатів порівняно з кортикальною кістковою тканиною [15]

їх синтез на сьогодні набагато дорожчий порівняно з традиційними ( $\alpha+\beta$ ) сплавами [18]. Тому вирішення зазначеної проблеми в короткостроковій перспективі шляхом масового застосування даних низькомодульних сплавів не можливе.

Найбільш простим технологічним рішенням пригнічення ефекту екранування напружень та отримання позитивних результатів щодо подовження терміну їх експлуатації, є надання металічним імплантатам пористої структури [19], в тому числі з використанням пористих покриттів [20]. Крім того, відомо [21], що шорсткість поверхні імплантату сприяє його остеоінтеграції. Так, дослідження [22] показали покращене прикріплення кістки до імплантату завдяки відтворенню внутрішньої пористості кістки на його поверхні. Фіксація імплантату досягається шляхом з'єднання між кісткою та його пористою матрицею, в результаті проростання кістки в пори імплантату та забезпечує

не тільки закріплення, а й систему, що дозволяє передавати навантаження від імплантату до кістки [23].

Сучасні тенденції розвитку автоматизації та комп'ютеризації започаткували напрямок адитивних технологій (АТ), відомих як технології 3D-друку. Їх також використовують для зниження ефекту екранування напружень шляхом отримання структур з градієнтом розміру та форми пор від поверхні до центра деталі [24]. Такі імплантати мають низку унікальних переваг таких, як висока біосумісність, відкрита взаємозв'язана структура пор, яка сприяє росту кісткової тканини, та наблизений до кісткового модуль пружності [25].

Найбільш розповсюдженими методами АТ для виготовлення металічних структур з функціональним градієнтом є методи селективного лазерного та електронно-променевого плавлення [26]. Градієнтні структури, отримані методом АТ, дозволяють забезпечувати зниження модуля пружності за рахунок наявності в них значного об'єму пор [27]. Існує широкий асортимент імплантатів як з наскрізною пористістю, так із суцільною основою з наявною пористою структурою на їх поверхні. Їх виготовляють такі відомі світові виробники, як Zimmer Biomet Trabecular Metal™, Lima Corporate Trabecular Titanium, Gruppo Bioimpiant Fin System, Permedica Orthopedics Trabecular Titanium TRASER (рис. 3).

Найбільш вагомою перепороною на шляху до масового застосування АТ у виготовленні імплантатів є їх праце- і матеріаломісткість. При цьому всі етапи виготовлення повинні бути узгоджені як з боку лікарів, так й інженерів [28]. У свою чер-



Рис. 3. Імплантати відомих виробників, отриманих із застосуванням АТ технологій [25]: а – Zimmer Biomet Trabecular Metal™; б – Lima Corporate Trabecular Titanium; в – Gruppo Bioimpiant Fin System; г – Permedica Orthopedics Trabecular Titanium TRASER®



гу існує проблема високої вартості витратних матеріалів для виготовлення 3D-імплантатів та їх обмежений за хімічним складом асортимент на ринку. Сучасний стан розвитку технологій АТ не дозволяє здійснювати друк з використанням різних матеріалів за один етап, а їх заміна відбувається тільки після повного припинення процесу та проведення операцій очищення від попередньо використовуваного матеріалу. Тому на сьогодні ці технології є рентабельними лише в тих випадках, коли інші методи не можуть бути задіяні або складність оперативного лікування потребує виготовлення індивідуальних імплантатів [29].

Порошкові технології спікання також знайшли своє застосування для отримання імплантатів в ортопедії. Дані технології виготовлення імплантатів включають найбільш поширені процеси пресування, іскрового плазмового спікання та штампування порошкових заготовок. Перевага даних методів у тому, що вихідною сировиною слугують порошки з металів, сплавів, кераміки та інших матеріалів [30]. За допомогою них можна отримувати вироби зі заданими характеристиками та розмірами, оскільки широкий спектр порошків з металів дозволяє обирати вихідні властивості цих порошків та передбачати їх у готовій продукції. Технології порошкової металургії можуть забезпечувати отримання високопористих матеріалів, що впливає на зниження ефекту екранування напружень. В огляді [31] представлено позитивні аспекти використання високовольтного струмового розряду для отримання пористих матеріалів з порошків титану, ніобію і танталу, які успішно можуть бути використані в медицині.

В роботі [32] продемонстровано отримання методом іскрового плазмового спікання титанових порошків з середнім діаметром частинок 110 мкм компактів, які мали пористість на рівні 28 % та модуль пружності на стиск 7,9 ГПа. Такі показники модуля пружності знаходяться в діапазоні зміни відповідної характеристики кортикальної кісткової тканини, тому, використовуючи такі покриття, можна досягти значних успіхів у пригніченні ефекту екранування напружень.

В роботі [33] зразки з відкритою пористістю у діапазоні 70...80 % були виготовлені з сферичних частинок титанового сплаву діаметром 0,5...1,0 мм і продемонстрували значення модуля пружності 0,86 ГПа, наближені до показників відповідної характеристики трабекулярної кісткової тканини.

Основний недолік методів порошкової металургії полягає в тому, що технологічний процес потребує довготривалої витримки зразків при високій температурі, а показники міцності імплантатів часто виявляються недостатніми. Одним із методів вирішення проблеми підвищення механічних харак-

теристик є використання дворазового спікання, що дозволяє підняти міцність пористих зразків більш ніж в 2 рази без помітного зменшення частки пористості [34]. Однак додаткові технологічні операції витримки при високих температурах протягом досить тривалого часу підвищують енергоємність виробничого процесу і, як наслідок, його вартість, та можуть змінювати структуру вихідного матеріалу.

Використання функціонально-градієнтних покриттів з різною об'ємною пористістю забезпечує поступове наближення модуля пружності від імплантату до кістки в результаті багатозарового покриття (рис. 4). Це дозволяє запобігти виникненню напружень, які призводять до його відшарування від серцевини в зоні контакту першого шару з максимальним модулем пружності, а також пригнітити ефект екранування напружень в зоні контакту останнього шару, який має найнижчий модуль пружності з кортикальною кістковою тканиною [35].

Високу ефективність застосування в якості імплантатів комбінованої конструкції показують внутрішньокісткові пластинки з компактною частиною зі сплаву ВТ1-0, на які методом вакуумного спікання було нанесене пористе покриття з титанового порошку, виготовлене за технологією холодного двостороннього пресування. В результаті утворена кісткова тканина навколо імплантату активно проникає вглиб нього, створюючи тим самим його вторинну фіксацію, а наявність пористості в покритті призводить до зниження модуля пружності [36].

В роботі [34] шляхом припикання при температурах 1233 та 1623 К титанових порошків на поверхні дентального імплантату було сформоване двошарове покриття з розміром пор 800...900 та 600...700 мкм відповідно (рис. 5).



Рис. 4. Розподіл модуля пружності між кісткою та імплантатом

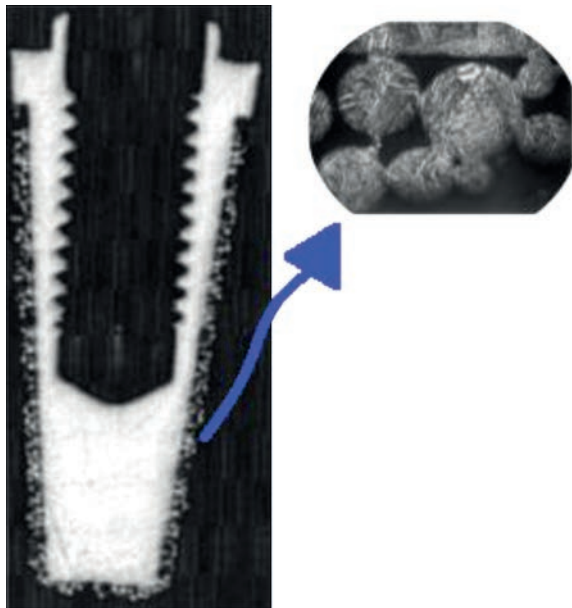


Рис. 5. Пористе покриття на дентальному імплантаті, отримане припіканням шарів титанового порошку [34]

Серед методів порошкової металургії для модифікації поверхні імплантатів шляхом нанесення пористих шарів також використовується іскрове плазмове спікання [37]. Межа міцності при згинанні та модуль пружності покриттів зі сплаву Ti6Al4V, отриманих цим методом, становили 128...178 МПа і 16...18 ГПа, відповідно, що відповідає діапазону зміни відповідних характеристик кортикальної кісткової тканини [38].

Основним недоліком методів припікання для отримання пористих структур з порошкових матеріалів на поверхнях імплантатів, як і у випадку з процесами об'ємного пресування та спікання, є показники міцності покриттів та високі температури обробки протягом значного проміжку часу. Наприклад, для отримання порошкових покриттів з титанового сплаву Grade 4 (сплав стандарту ASME) зі ступенем об'ємної пористості в діапазоні 30...50 %, який забезпечує модуль пружності, наближений до відповідної величини кортикальної кісткової тканини, їх необхідно спікати при температурах 1000...1100 °C протягом 2 годин [39].

Останнім часом набула популярності технологія лазерної модифікації поверхні металічних матеріалів, в якій лазер використовують як джерело теплоти (рис. 6). Дана технологія нанесення градієнтних покриттів на виробі з титанових сплавів розглядається як конкурентний метод, який дозволяє контролювати точність і особливості поверхні імплантату, являючись при цьому високоефективною, екологічно чистою та економічною з точки зору витратних матеріалів [40]. Однак міцність зчеплення з основою покриттів, нанесених лазерним припіканням порошку, іноді є недостатньою і прикладені напруження можуть перевищувати її, що викликає відшарування по-

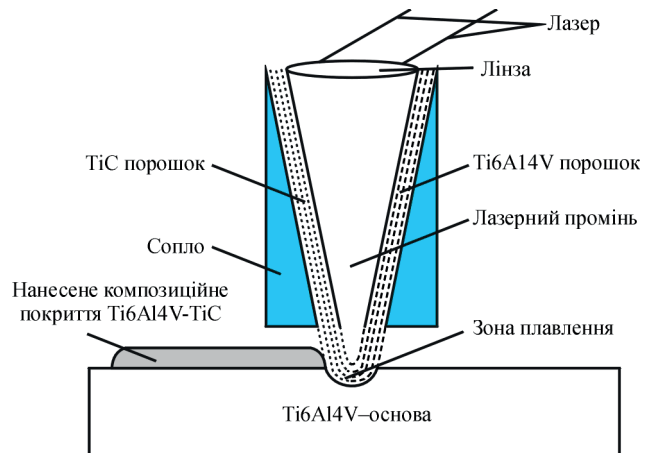


Рис. 6. Схема процесу лазерного припікання порошку покриття від поверхні протеза, тим самим порушуючи його функцію [41].

Імплантати з низьким модулем пружності виготовляє відома компанія Zimmer Biomet, засновниця запатентованої технології отримання трабекулярної структури Trabecular Metal™. Ця структура аналогічна кістковій тканині і складається з пористого склоподібного вуглецю, покритого за допомогою напилення в вакуумі танталом [42, 43]. Отримані імплантати мають пористість 80,9 %, розмір пор  $527 \pm 27$  мкм та модуль пружності 3 ГПа.

Сучасні імплантати виготовлені із застосуванням технологій АТ також імітують поверхні із трабекулярною структурою (рис. 7). Проте наявність пор в їх об'ємі призводить до зниження міцності таких структур, через що їх використання обмежується лише тими місцями імплантації, де вони не несуть основного експлуатаційного навантаження. Протипоказанням до використання даних імплантатів у практичному аспекті є наявність септичного процесу при втручанні, оскільки основним недоліком трабекулярних компонентів є труднощі їхньої експлантації [25].

В літературі зустрічаються й інші підходи до зниження модуля пружності із використанням сучасних полімерних матеріалів таких, як РЕЕК. Так, в роботі [44] описано інноваційний підхід зниження модуля пружності металевго імплантату завдяки застосуванню композитного матеріалу вуглець/полімер (РЕЕК), який формується на поверхні кульшових суглобів. Проведені модельні та чисельні результати свідчать, що композитний матеріал вуглець/полімер суттєво підвищує характеристики опору втомі шарів покриття з розподілом прикладеного навантаження і перенесенням його на кістку, що знижує ефект екранування напружень та забезпечує кращу стабільність імплантату протягом тривалого терміну експлуатації.

Однак ця концепція застосування покриття була лише змодельована та не підтверджена практични-



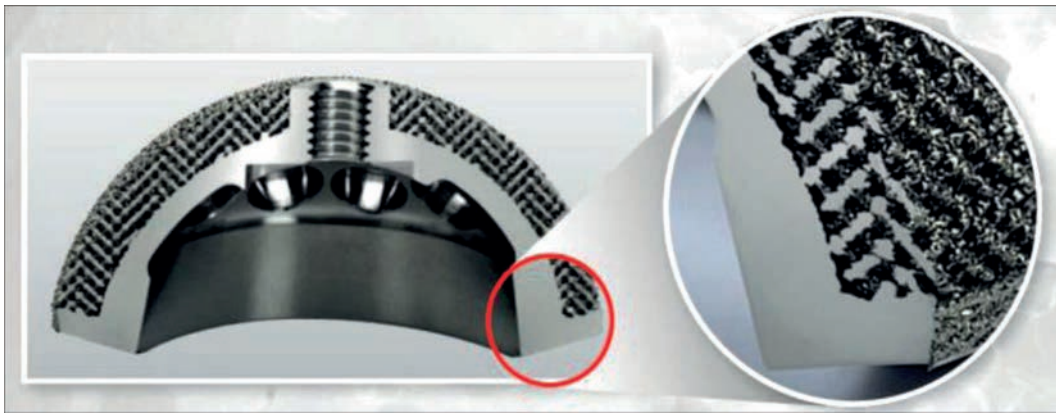


Рис. 7. Імплантат чашка кульшового суглоба із трабекулярною структурою [25]

ми результатами, які можуть значно відрізнятися від розрахункових, а їх використання може виявити низку інших проблем таких, як закріплення остеобластів на поверхнях РЕЕК матеріалу.

На відміну від розглянутих вище методів на сьогодні найбільш доступним та технологічно простим у реалізації отримання пористих структур на поверхнях імплантатів із підтвердженими багаточисленними успішними результатами практичного застосування є метод плазмового напилення (рис. 8). Цей метод привернув велику увагу в біомедицині завдяки низькій вартості, високій ефективності та широкому регулюванню товщини покриття з можливістю використання різних розпилювальних матеріалів на одному обладнанні [46, 47]. Успішному застосуванню плазмового напилення для отримання покриттів сприяє кілька чинників: висока продуктивність процесу напилення; відносно незначне нагрівання основи (до  $< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), що знижує ймовірність зміни її властивостей; простота управління процесом отримання покриття (енергетичні характеристики плазми можна змінювати технологічно залежно від вимог в процесі отримання покриття); можливість використання автоматизованого маніпулятора в процесі нанесення покриттів, що сприяє рівномірному розподілу напиленого шару по поверхні деталі.

Універсальність і гнучкість технології плазмового напилення дозволяє її підлаштувати майже

під будь-який спектр розпилювальних матеріалів таких, як метали та їх оксиди, апатити та інші матеріали [48].

Накопичено значний досвід застосування плазмового напилення для поліпшення поверхні дентальних імплантатів за рахунок нанесеного плазмовим напиленням шару порошку титану та порошку гідроксиапатиту, який впливає на пришвидшення остеоінтеграції [49]. До недоліків даного методу нанесення покриттів відносять порівняно невисоку міцність зчеплення покриття з основою, а також низький коефіцієнт використання матеріалу. Особливо істотні втрати матеріалу будуть при напиленні імплантатів малих розмірів (міжхребцевих кейджів, стоматологічних імплантатів), при цьому також можливий перегрів малорозмірного виробу в результаті впливу високотемпературного плазмового струменя. Для скорочення втрат матеріалу, викликаних тим, що розмір деталі менше плями напилення, необхідно прагнути до зменшення діаметра останньої.

Вирішення деяких зазначених вище проблем можливе шляхом використання розробленої в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України технології мікроплазмового напилення, яка забезпечує формування плазмового струменя зі зниженою тепловою потужністю і плямою напилення малого розміру [50]. Конструкційна особливість обладнання, а

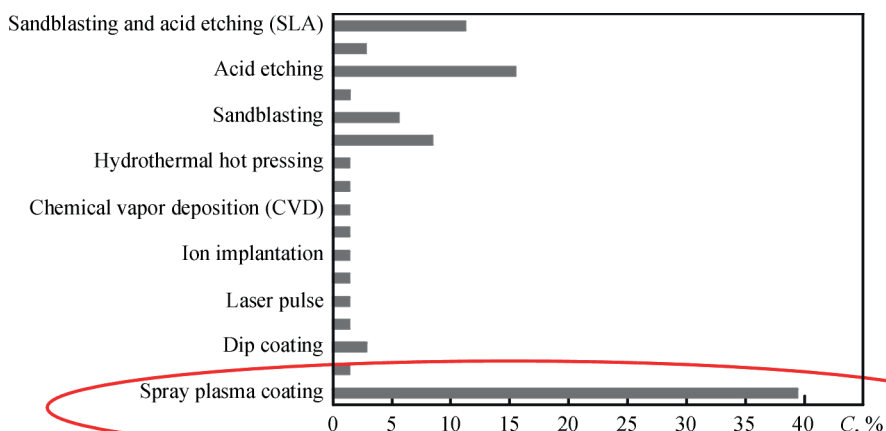


Рис. 8. Поширення технологій отримання пористих структур на поверхнях імплантатів [45]

сама мікроплазмотрона в сукупності з технологічними підходами дозволяють розпилювати як порошкові, так і дротяні матеріали зі формуванням структур з високим ступенем пористості та розміром пор до 300 мкм. Такі структури підвищують остеointegraцію з кісткою зі забезпеченням необхідних показників механічної міцності системи покриття—основа [51], що дозволяє застосувати їх на поверхнях ендопротезів для безцементного фіксування [52]. Таким чином, технологія мікроплазмового напилення є перспективною для модифікування поверхонь імплантатів, оскільки сформовані таким методом покриття зі сплавів на основі титану або цирконію з максимально можливим ступенем пористості (25 % для титанового та 20,3 % для цирконієвого сплаву) та модулем пружності 12 і 5 ГПа відповідно [53] дозволяють значно наблизити їх до відповідної характеристики кортикальної кісткової тканини, що сприятиме більш рівномірному розподілу напружень під час експлуатації імплантатів.

## Висновки

1. Проведено аналіз сучасних літературних джерел щодо виникнення асептичної нестабільності та встановлено, що однією з причин її появи є ефект екранування напружень (Stress shielding), зумовлений невідповідністю модулів пружності імплантату та кісткової тканини.

2. Проаналізовано методи зниження модуля пружності ортопедичних імплантатів з метою попередження ефекту екранування напружень такі, як використання низькомодульних сплавів, адитивні технології, порошкове спікання та плазмове напилення.

3. Встановлено, що на сьогодні найбільш ефективними і економічно доцільними методами отримання пористих структур на поверхнях імплантатів є технології плазмового напилення. Зокрема показано, що використання технології мікроплазмового напилення покриттів на поверхню імплантатів усуває недоліки, притаманні звичайному плазмовому напиленню, а також сприяє пригніченню ефекту екранування напружень.

## Список літератури/References

1. Malnick, S.D.H., Knobler, H. (2006) The medical complications of obesity. *QJM: An International Journal of Medicine*, **9** (99), 565–579. DOI: <https://doi.org/10.1093/qjmed/hcl085>
2. Musumeci, G., Aiello, F.C., Szychlinska, M.A. et al. (2015) Osteoarthritis in the XXIst century: risk factors and behaviours that influence disease onset and progression. *International Journal of Molecular Sciences*, **3** (16), 6093–6112. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms16036093>
3. Johnson, V.L., Hunter, D.J. (2014) The epidemiology of osteoarthritis. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, **1** (28), 5–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.berh.2014.01.004>
4. Zethraeus, N., Borgström, F., Ström, O. et al. (2007) Cost-effectiveness of the treatment and prevention of osteoporosis: A review of the literature and a reference model. *Osteoporosis International*, **1** (18), 9–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00198-006-0257-0>
5. Barrère, F., Mahmood, T.A., de Groot, K., van Blitterswijk, C.A. (2008) Advanced biomaterials for skeletal tissue regeneration: Instructive and smart functions. *Materials Science and Engineering R: Reports*, **1-6** (59), 38–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msere.2007.12.001>
6. Косяков А.Н., Гребенников К.А., Милосердов А.В. и др. (2019) 3D-планирование и прототипирование при сложном первичном эндопротезировании тазобедренного сустава. *Травма*, **5** (20), 53–61. DOI: <https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.20.2019.185557>
7. Quinn, J., McFadden, R., Chan, C.-W., Carson, L. (2020) Titanium for orthopedic applications: an overview of surface modification to improve biocompatibility and prevent bacterial biofilm formation. *Science*, **11** (23), Article number 101745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101745>
8. Evans, J.T., Evans, J.P., Walker, R.W. et al. (2019) How long does a hip replacement last? A systematic review and meta-analysis of case series and national registry reports with more than 15 years of follow-up. *The Lancet*, **10172** (393), 647–654. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31665-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31665-9)
9. Kuibida V., Kokhanets P. and Lopatynska V. (2021) Mechanism of strengthening the skeleton using pyrometrics. *Journal of Physical Education and Sport*, **3** (21), 1309–1316. DOI: <https://doi.org/10.7752/jpes.2021.03166>
10. Arabnejad, S., Johnston, B., Tanzer, M., Pasini, D. (2017) Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress-shielding following total hip arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research*, **8** (35), 1774–1783. DOI: <https://doi.org/10.1002/jor.23445>
11. Zhang, B., Pei, X., Zhou, C. et al. (2018) The biomimetic design and 3D printing of customized mechanical properties porous Ti6Al4V scaffold for load-bearing bone reconstruction. *Materials and Design*, **152**, 30–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.065>
12. Attarilar, Sh., Djavanroodi, F., Irfan, O.M. et al. (2020) Strain uniformity footprint on mechanical performance and erosion-corrosion behavior of equal channel angular pressed pure titanium. *Results in Physics*, **17**, Article number 103141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103141>
13. Apostu, D., Lucaciu, O., Lucaciu, G.D.O. et al. (2017) Systemic drugs that influence titanium implant osseointegration. *Drug Metabolism Reviews*, **1** (49), 92–104. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602532.2016.1277737>
14. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. (1990) *Конструкционные материалы*. Арзамасов Б.Н. (ред.). Москва, Машиностроение.
15. Arzamasov, B.N., Brostrem, V.A., Bushe, N.A. et al. (1990) *Structural materials*. Ed. by B.N. Arzamasov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
16. Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R., Gogia, A.K. (2009) Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants: A review. *Progress in Materials Science*, **3** (54), 397–425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004>
17. Niinomi, M., Nakai, M., Hieda, J. (2012) Development of new metallic alloys for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, **11** (8), 3888–3903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.06.037>
18. Lubov Donaghy C., McFadden R., Kelaini S. et al. (2020) Creating an antibacterial surface on beta TNZT alloys for hip implant applications by laser nitriding. *Optics and Laser Technology*, **121**, Article number 105793. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105793>
19. Liu, J., Chang, L., Liu, H. et al. (2017) Microstructure, mechanical behavior and biocompatibility of powder metallurgy Nb–Ti–Ta alloys as biomedical material. *Materials*



- Science and Engineering C: Materials for Biological Applications*, **71**, 512–519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.10.043>
19. Wen, C.E., Mabuchi, M., Yamada, Y. et al. (2001) Processing of biocompatible porous Ti and Mg. *Scripta Materialia*, **10** (45), 1147–1153. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01132-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01132-0)
  20. Mahmoud, D., Elbestawi, M.A. (2017) Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: A review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* **1**, **2** (13), Article number jmmpp1020013. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmpp1020013>
  21. Kane, R., Ma, P.X. (2013) Mimicking the nanostructure of bone matrix to regenerate bone. *Materials Today*, **11** (16), 418–423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.11.001>
  22. Pałka, K., Pokrowiecki, R. (2018) Porous titanium implants: A review. *Advanced Engineering Materials*, **5** (20), Article number 1700648. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201700648>
  23. Schneider, E., Kinast, C., Eulenberger, J. et al. (1989) A comparative study of the initial stability of cementless hip prostheses. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **248**, 200–209. DOI: <https://doi.org/10.1097/00003086-198911000-00032>
  24. Yuan, L., Ding, S., Wen, C. (2019) Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review. *Bioactive Materials*, **1**(4), 56–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2018.12.003>
  25. Косяков А.Н., Гребенников К.А., Милосердов А.В. и др. (2019) Применения трабекулярных компонентов в эндопротезировании тазобедренного сустава (Обзор). *Вісник ортопедії, травматології та протезування*, **4** (103), 116–123. DOI: <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2019-103-4-110-117>
  26. Kosyakov, A.N., Grebennikov, K.A., Miloserdov, A.V. et al. (2019) Applications of trabecular components during endoprosthesis of hip joint (Review). *Visnyk Ortopedii, Travmatologii ta Protezuvaniya*, **4** (103), 116–123 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2019-103-4-110-117>
  27. Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssoulouris, G. (2016) Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **1-4** (83), 389–405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
  28. Chashmi, M.J., Fathi, A., Shirzad, M. et al. (2020) Design and analysis of porous functionally graded femoral prostheses with improved stress shielding. *Designs*, **2**(4), 1–15, Article number 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/designs4020012>
  29. Косяков А.Н., Гребенников К.А., Милосердов А.В. и др. (2018) Возмещение костных дефектов вертлужной впадины с использованием аддитивных технологий. *Вісник ортопедії, травматології та протезування*, **4** (99), 64–74. DOI: <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2018-99-4-64-74>
  30. Kosyakov, A.N., Grebennikov, K.A., Miloserdov, A.V. et al. (2018) Compensation of bone defects of cotyloid cavity using the additive technologies. *Visnyk Ortopedii, Travmatologii ta Protezuvaniya*, **4** (99), 64–74 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2018-99-4-64-74>
  31. Shi, H., Zhou, P., Li, J. et al. (2021) Functional gradient metallic biomaterials: techniques, current scenery, and future prospects in the biomedical field. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **8**, Article number 616845. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.616845>
  32. Goodall, R. (2013) *Advances in Powder Metallurgy*. Elsevier.
  33. Minko, D., Belyavin, K. (2016) A porous materials production with an electric discharge sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **59**, 67–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.05.015>
  34. Sakamoto, Y., Asaoka, K., Kon, M. et al. (2006) Chemical surface modification of high-strength porous Ti compacts by spark plasma sintering. *Bio-Medical Materials and Engineering*, **2** (16), 83–91. PubMed ID: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16477117>
  35. Jia, J., Siddiq, A.R., Kennedy, A.R. (2015) Porous titanium manufactured by a novel powder tapping method using spherical salt bead space holders: Characterization and mechanical properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **48**, 229–240 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.04.018>
  36. Itin, V.I., Ponter, V.É., Khodorenko, V.N. et al. (1997) Strength properties of porous permeable stomatological materials based on titanium. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **9-10** (36), 479–482. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02680496>
  37. Helsen, J.A., Breme, H.J. (1998) *Metals as biomaterial*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd.
  38. Smetkin, A.A., Konyukhova, S.G., Yarmonov, A.N. (2003) Application of porous permeable materials in dental implant technique. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Tsvetnaya Metallurgiya*, **5**, 65–67.
  39. Kon, M., Hirakata, L.M., Asaoka, K. (2004) Porous Ti–6Al–4V alloy fabricated by spark plasma sintering for biomimetic surface modification. *Journal of Biomedical Materials Research – Part B: Applied Biomaterials*, **1** (68), 88–93. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.20004>
  40. Nomura, N., Oh, I.-H., Hanada, S. et al. (2005) Effect of nitrogen on mechanical properties of porous titanium compacts prepared by powder sintering. *Materials Science Forum*, **III** (475-479), 2313–2316. DOI: <https://doi.org/10.4028/0-87849-960-1.2313>
  41. Torres, Y., Pavón, J.J., Nieto, I., Rodríguez, J.A. (2011) Conventional powder metallurgy process and characterization of porous titanium for biomedical applications. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, **4** (42), 891–900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9521-6>
  42. Weng, F., Chen, C.Z., Yu, H.J. (2014) Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review. *Materials and Design*, **58**, 412–425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.077>
  43. Mohseni, E., Zalnezhad, E., Bushroa, A.R. (2014) Comparative investigation on the adhesion of hydroxyapatite coating on Ti–6Al–4V implant: A review paper. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **48**, 238–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.09.030>
  44. Christie, M.J. (2002) Clinical applications of trabecular metal. *American Journal of Orthopedics (Belle Mead, N.J.)*, **4**(31), 219–220. PubMed ID: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12008854>
  45. Levine, B.R., Sporer, S., Poggie R.A. et al. (2006) Experimental and clinical performance of porous tantalum in orthopedic surgery. *Biomaterials*, **27** (27), 4671–4681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.04.041>
  46. Darwich, A., Nazha, H., Daoud, M. (2020) Effect of coating materials on the fatigue behavior of hip implants: A three-dimensional finite element analysis. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, **2**, 284–295. DOI: <https://doi.org/10.22055/JACM.2019.30017.1659>
  47. Jemat, A., Ghazali, M.J., Razali, M., Otsuka, Y. (2015) Surface modifications and their effects on titanium dental implants. *BioMed Research International*, Article number 791725. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/791725>
  48. Sun, L. (2018) Thermal spray coatings on orthopedic devices: When and how the FDA reviews your coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, **8**(27), 1280–1290. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0759-2>
  49. Alontseva, D., Voinarovych, S., Ghassemich, E. 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*, **2** (64), 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1595/205651320x15737283268284>
  50. Cizek, J., Matejicek, J. (2018) Medicine meets thermal spray technology: A review of patents. *Journal of Thermal Spray*

*Technology*, 8(27), 1251–1279. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0798-8>

49. Лясников В.Н., Лепилин А.В., Протасова Н.В. (2013) Научные основы разработки дентальных имплантатов. *Саратовский научно-медицинский журнал*, 3(9), 431–434.  
Lyasnikov, V.N., Lepilin, A.V., Protasova, N.V. (2013) Scientific fundamentals of development of dental implants. *Saratovskii Nauchno-Meditsinskii Zhurnal*, 3(9), 431–434 [in Russian].
50. 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.
51. Voinarovych, S.G., Alontseva, D.L., Kyslytsia, O.M. et al. (2022) Microplasma spraying of coatings using zirconium wire. *Ibid*, 9, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.09.07>
52. Гайко Г.В., Панченко Л.М., Підгаєцький В.М. та ін. (2008) Вплив різних типів покриття для безцементного ендопротеза на клоногенну активність стовбурових стромальних клітин кісткового мозку хворих на остеоартроз кульшового суглоба в умовах in vitro (Експериментальне дослідження). *Вісник ортопедії, травматології та протезування*, 4(59), 5–11. DOI: <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2018-59-4-5-11>
53. Moltasov, A., Dyman, M., Kaliuzhnyi, S. et al. (2022) Dependence of the elasticity modulus of microplasma coatings made of titanium grade VT1-00 and zirconium grade KTC-110 on their porosity. *Series on Biomechanics*, 2(36), 142–153. DOI: <http://doi.org/10.7546/sb.36.2022.02.14>

## METHODS TO PREVENT THE STRESS SHIELDING EFFECT IN IMPLANT-BODY SYSTEM (Review)

A.V. Moltasov<sup>1</sup>, S.G. Voinarovych, M.M. Dyman<sup>1</sup>, S.M. Kalyuzhnyi<sup>1</sup>, S.V. Burburska<sup>2</sup>

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

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>OSTEONIKA Limited Liability Company. 98 Striiska Str., 79026, Lviv, Ukraine. E-mail: [ito3dlab@gmail.com](mailto:ito3dlab@gmail.com)

Statistical data of many national registers and medical societies show that aseptic instability of the hip joint prosthesis is one of the main obstacles in the path to application of orthopedic implants. One of the causes for aseptic instability is manifestation of stress shielding effect, which is due to mismatch of the moduli of elasticity of the implant and bone tissue. Methods are considered, which allow lowering the modulus of elasticity of the metal implant, bringing it closer to the respective modulus of elasticity of bone tissue. It is found that reaching the posed goal by replacement of the traditional metals, which are used for implant manufacture, by alloys with much lower modulus of elasticity, is a task, which has not been solved technologically in their mass production. The currently most common methods of lowering the modulus of elasticity of orthopedic implants were analyzed, and their advantages and short-comings are indicated. The most serious problem in mass application of advanced additive technologies in implant manufacture is their labour- and material consumption. It is found that application of surface modification technologies, in particular plasma methods of porous coating deposition is the most affordable and effective method of lowering the modulus of elasticity of the implant surface, contacting the bone, with a high probability of reduction of the stress shielding effect manifestation. 53 Ref., 8 Fig.

*Keywords: orthopedic implant, titanium alloys, modulus of elasticity, porous coatings, surface modification*

Надійшла до редакції 29.11.2022

## ПЕРЕДПЛАТА 2023

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	280	840	1680	3360
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	280	560	1120
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	280	560	1120
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	560	1680	3360	6720

\*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

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

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

*Передплата на електронну версію журналів.*

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

*Передплата через сайт видавництва:*

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

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

На сайті видавництва у 2023 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2021 рр.



## СУЧАСНІ МОДЕЛІ УТВОРЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, В.Л. Демченко, Є.П. Мамуня

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

Процес зварювання пластмас визначається як поступове зникнення межі розподілу між деталями, що з'єднуються та формування між ними перехідного шару, структура якого суттєво відрізняється від структури основного полімерного матеріалу. Існуючі на даний час моделі утворення зварних з'єднань полімерів беруть за основу різні фізичні феномени – взаємну адгезію субстратів, дифузію макромолекул, реологію розплаву. Найбільш поширеною є дифузійна модель рептації макромолекул у зоні зварювання, на яку посилаються багато дослідників для пояснення експериментальних даних. Не заперечуючи можливість поступальної дифузії елементів молекулярного ланцюга крізь поверхню сплавлення, ми вважаємо дискусійним положення, що саме така дифузія забезпечує основний масоперенос при утворенні зварного з'єднання полімерів. Більш реалістичною є теорія утворення зварних з'єднань полімерів за рахунок конформаційних перетворень фрагментів макромолекул, що розробляється науковою школою Інституту електрозварювання (ІЕЗ) ім. С.О. Патона. В розвиток цієї конформаційної теорії, запропоновано модель гомогенізації перехідного шару на межі розділу фаз при зварюванні полімерів за ваканційно-конформаційним принципом. Бібліогр. 24, рис. 12.

*Ключові слова:* полімерні матеріали, зварювання, дифузія макромолекул, конформаційні перетворення

**Вступ.** Розуміння механізму утворення зварного з'єднання полімерних матеріалів необхідне для адекватного вибору технології та параметрів режиму зварювання, а також методів оцінки якості зварного з'єднання. Однак досі відсутня єдина точка зору та існує декілька гіпотез цього механізму. Ще з 1980-х років науковою школою ІЕЗ ім. С.О. Патона запропонована та розробляється теорія утворення зварних з'єднань полімерів за рахунок конформаційних перетворень фрагментів макромолекул. Метою даної роботи є огляд існуючих пояснень механізму створення зварного з'єднання полімерних матеріалів та наведення додаткових аргументів на користь інформаційної теорії.

Фізико-хімічні властивості металів та пластмас кардинально різняться, однак в процесах зварювання цих типів матеріалів є багато спільного, оскільки обидва вони з точки зору фізики є твердими тілами. Наукове визначення процесу зварювання – це отримання нерознімного з'єднання твердих тіл, монолітність якого досягається забезпеченням фізико-хімічних, атомно-молекулярних зв'язків між елементарними частинками тіл, що з'єднуються [1]. Або, так зване термодинамічне визначення: зварювання – процес отримання монолітного з'єднання матеріалів за рахунок введення та термодинамічно необоротного перетворення енергії та речовини в місці з'єднання.

Загальною властивістю твердих тіл, зокрема пластмас, є збереження межі розділу між поверхнями торкання окремих тіл при їх контакті. Тому було сформульовано таке визначення зварювання пластмас – це технологічний процес отримання не-

Кораб М.Г. – <http://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, Юрженко М.В. – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>, Демченко В.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-9146-8984>, Мамуня Є.П. – <https://orcid.org/0000-0003-3855-2786>  
© М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, В.Л. Демченко, Є.П. Мамуня, 2023

рознімного з'єднання елементів конструкції шляхом дифузійно-реологічної або хімічної взаємодії макромолекул полімерів, у результаті якого зникає межа розділу та утворюється структурний перехід від одного полімерного елемента до іншого [2]. Інший варіант подібного визначення: зварювання полімерних матеріалів – технологічний процес одержання нерознімного з'єднання деталей і елементів конструкції, в результаті якого між деталями з полімерних матеріалів зникає первісна межа розділу, перетворюючись в перехідний шар з однорідною або різнорідною хімічною структурою [3].

Міжнародний стандарт ISO дає досить просте визначення: «зварювання пластмас - це процес з'єднання розм'якшених поверхонь матеріалів, як правило, за допомогою тепла» [4].

Таким чином, сутністю зварного з'єднання вважається розмивання та зникнення поверхні розділу між деталями, на відміну від адгезійного з'єднання, де поверхня розділу завжди залишається та чітко видна. З початком застосування перших способів зварювання пластмас науковці почали висувати гіпотези про механізми утворення зварних з'єднань полімерних матеріалів.

**Основна частина.** Дослідники в роботі [5], вивчаючи особливості теплового зварювання поліметилметакрилату (РММА), висловили припущення, що зварне з'єднання формується по дифузійному механізму аутогезії (зчеплення між приведеними в контакт поверхнями одного і того ж полімерного матеріалу). В подальшому теорію дифузійної аутогезії було розвинуто, взаємне переміщення фрагментів макромолекул через по-

верхню контакту при зварюванні пояснювали тепловим броунівським рухом сегментів молекули та ковзанням їх між собою у високоеластичному (для аморфних полімерів) та в'язкотекучому стані [6, 7].

Пізніше американський дослідник Річард Вул (R. Wool) запропонував дифузійну гіпотезу «заліковування тріщин у полімерах», що складається з п'яти етапів, схематично показаних на рис. 1 [8]. Пунктирною лінією показана умовна лінія розділу з'єднання, в середині кола – так званий випадковий клубок макромолекулярного ланцюга (для наочності показаний тільки з одного боку). Перші два етапи – перебудова поверхні (звичай розплавлення під дією тепла) та зближення поверхонь до їх контакту (*a*, *б*). Третій етап – взаємне змочування поверхонь (*в*), четвертий – початок дифузії на деяку відстань (*г*)  $\chi$  та останній п'ятий етап (*д*) – взаємна дифузія на відстань  $\chi_{\infty}$  та розмивання лінії розділу.

Будову аморфних полімерів схематично уявляють, як сітчасту структуру випадкових зв'язків макромолекулярних ланцюгів між собою. Існують альтернативні гіпотези утворення таких зв'язків – за рахунок складчастих кластерних структур [9, 10], та через безпосереднє зачеплення одного молекулярного ланцюга повинен утворити хоча б одне з іншим – теорія мостових зв'язків в полімерному масиві [11]. Відповідно з цією теорією, при утворенні зварного з'єднання між макромолекулами вздовж лінії сплавлення також повин-

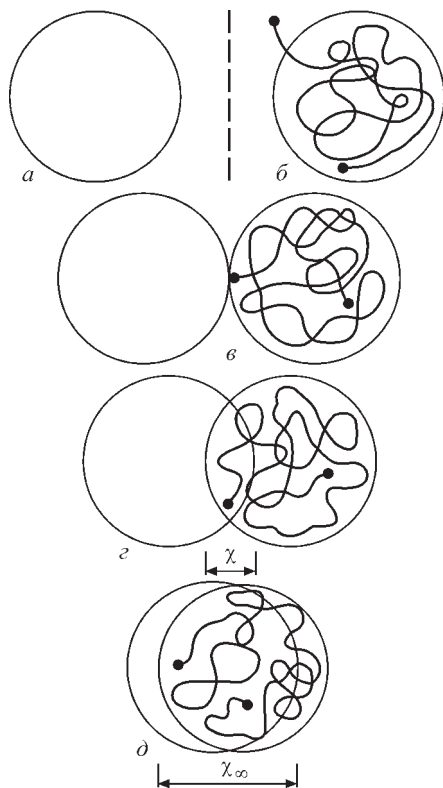


Рис. 1. Принципова схема етапів утворення зварного з'єднання Річарда Вула (R. Wool)

ні формуватись мостові зв'язки – зачеплення, що схематично показано на рис. 2. Товстою лінією показано мінімальну структуру молекулярного моста через лінію розділу, яка необхідна для формування зварного шва. З використанням цієї моделі пояснюють механізм утворення структур різної міцності вздовж лінії сплавлення в залежності від теплофізичних умов процесу зварювання [12].

У західній літературі в рамках дифузійної гіпотези використовують термін «healing» – «заліковування» для описання процесу утворення зварного з'єднання полімерів, що ілюструється на рис. 3 [13]. Після виникнення взаємного контакту між оплавленими поверхнями полімерних елементів, що зварюються, розпочинається процес дифузії молекулярних ланцюгів через поверхню стику та їх заплутування. Показано, що основною умовою «заліковування» слід вважати досить трива-

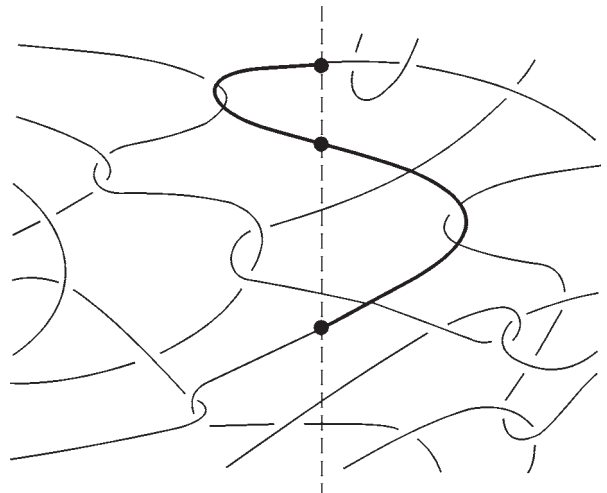


Рис. 2. Ілюстрація моделі утворення зварного з'єднання полімерів за рахунок зачеплень макромолекул у роботі [11]

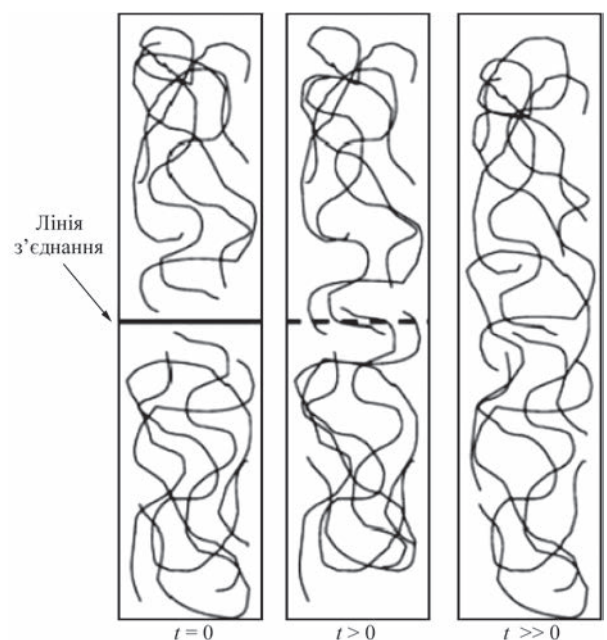


Рис. 3. Ілюстрація дифузійної моделі утворення зварного з'єднання полімерів у роботі [13]



ле перебування полімеру у розплавленому стані, коли процеси переміщення макромолекул активні. Однак дискусійним залишається питання самого дифузійного механізму «заліковування» (розмивання, зникнення) межі сплавлення у зварному з'єднанні.

Для пояснення механізму можливої самодифузії полімерного ланцюга французький фізик П'єр де Женн (de Gennes) з колегами розробив теорію рептації. Вважається, що макромолекула оточена іншими ланцюгами з усіх боків та не може зміщуватись убік, однак може переміщуватись у поздовжньому напрямку крізь таке оточення як свого роду трубку, тунель (рис. 4). Такий рух макромолекули назвали рептацією та умовно порівнювали із рухом змії, яка пробирається крізь купу гілок [14]. Оскільки в умовах розплаву всі молекули перебувають у тепловому броунівському русі, ланцюги, що утворюють стінки трубки постійно оновлюються.

Вважається, що основним чинником, який впливає на параметри рептаційної трубки, є щільність флуктуаційної сітки зачеплень між макромолекулами, яка існує в розплаві полімеру. Для гнучких полімерних ланцюгів відстань між окремими зачепленнями оцінюється у межах від 50 до 500 статистичних молекулярних сегментів. Це відповідає досить довгим відрізкам ланцюга з довжиною у межах  $10^4 \dots 10^5$ . Тому було припущено, що

такі довгі відрізки складаються в послідовність субмолекулярних клубків, яка розташовується всередині рептаційної трубки (рис. 5). Характерний розмір клубка (1) і визначає середній діаметр трубки  $d$ .

Слід відзначити, що рухливість макромолекули у межах теорії рептації суттєво залежить від її довжини, тобто молекулярної маси. Вважається, що час переміщення молекули в процесі рептації зростає пропорційно кубу її молекулярної маси. Отже, найбільше такі переміщення будуть спостерігатись для коротких молекулярних ланцюгів. Однак, розглядається, також, можливість рептаційного переміщення фрагментів молекулярних ланцюгів складної будови – розгалужених, зіркоподібних та циклічних. Так, розгалужений полімерний ланцюг може в процесі руху втягнути бокову гілку в рептаційну трубку з наступною її новою випадковою конформацією назовні. Циклічні полімерні ланцюги можуть складатись у лінійні конформації та у такому вигляді здійснювати рептаційні переміщення. Через велику складність механізмів переміщення ланцюгів нелінійних форм у розплаві, рептаційне переміщення макромолекул складних форм буде відбуватись дуже повільно.

Розглянемо можливі альтернативні механізми утворення зварних з'єднань полімерів. Процеси зварювання полімерних матеріалів та металів у

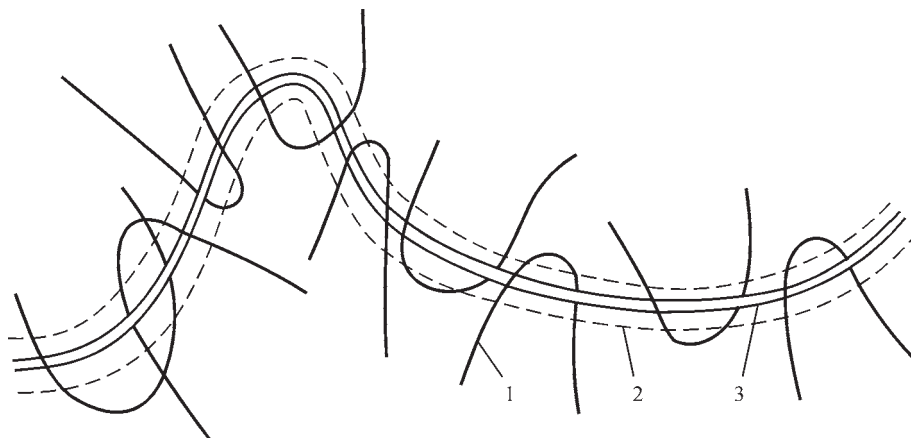


Рис. 4. Схема утворення «трубки» з молекулярних ланцюгів, згідно з теорією рептації: 1 – молекули оточення; 2 – умовні межі трубки; 3 – ланцюг, спроможний до рептації

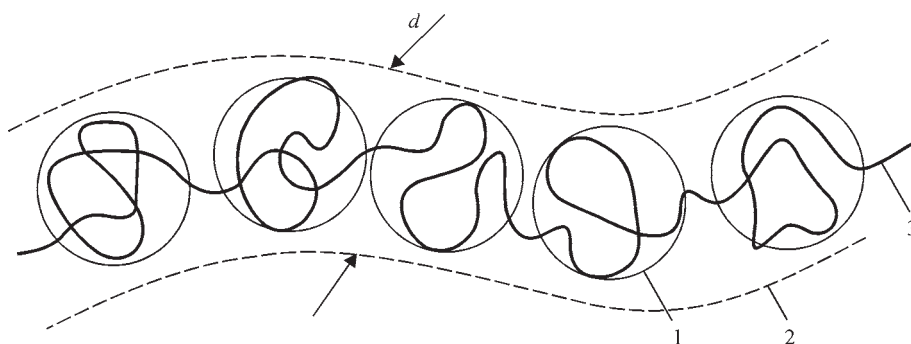


Рис. 5. Молекула, що складається з послідовності невеликих клубків (субмолекул) всередині «трубки»: 1 – молекулярний клубок; 2 – умовна межа трубки; 3 – полімерний ланцюг

багатьох випадках подібні. При контактному стиковому зварюванні металевих деталей утворюється структура, схожа на зварні шви полімерних матеріалів, виконані нагрітим інструментом встик. На рис. 6 показана макроструктура контактного зварного з'єднання гарячекатаної шаруватої феррито-перлітної сталі. При зварюванні без оплавлення (*a*) горизонтальна шарувата структура сталі змінює орієнтацію, відхиляючись у вертикальному напрямку вздовж лінії з'єднання. При зварюванні з оплавленням (*б*) на торцях утворюється суцільний шар розплавленого матеріалу, як суміш розплавів обох деталей, більша частина якого зусиллям осадження витісняється у ґрат. При охолодженні метал кристалізується та утворює зварне з'єднання. Вважається, що перші стикові з'єднання формуються у твердій фазі а другі комбіновано у твердо-рідкій фазі нагрітого матеріалу [15]. В останньому випадку зварне з'єднання утворюється за рахунок кристалізації тонкого шару розплавленого металу по поверхні розподілу. За аналогією з цим механізмом було запропоновано

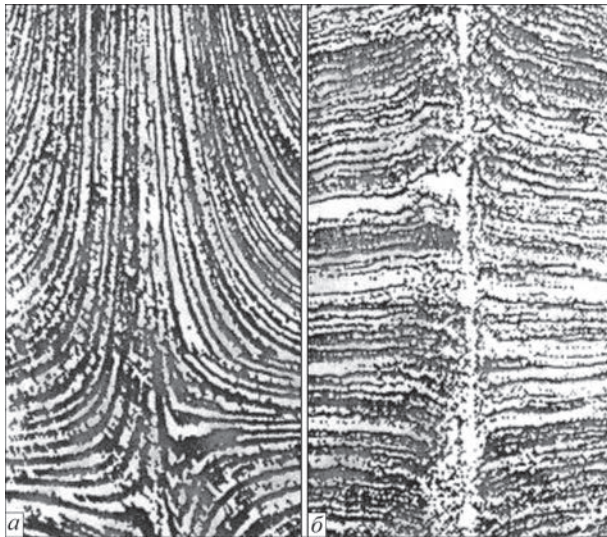


Рис. 6. Макроструктура контактних зварних з'єднань трубної сталі: *a* – зварювання без оплавлення кромки; *б* – зварювання з оплавленням [15]

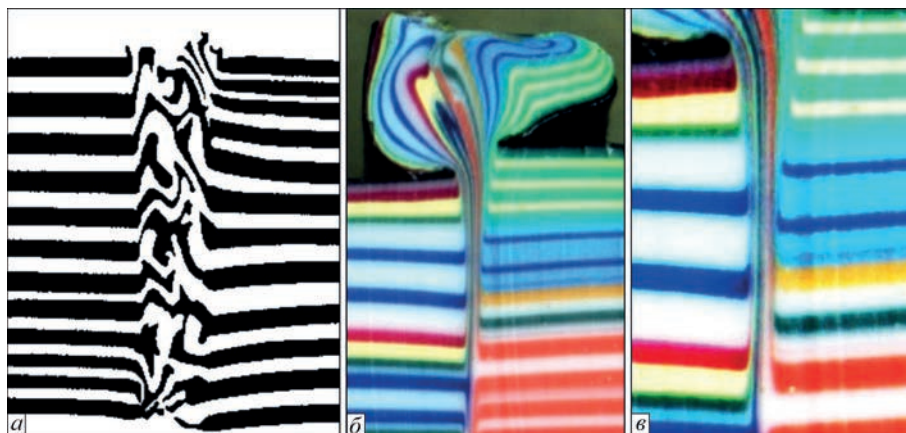


Рис. 7. Результати досліджень реологічних процесів при зварюванні шаруватих термопластів нагрітим інструментом встик *a* – у роботі [16]; *б, в* – за даними ІЕЗ [2]

«реологічну концепцію» утворення зварних з'єднань термопластичних полімерів. Вважалося, що, визначальну роль у формуванні з'єднання має реологія – течія розплаву полімеру при осадженні деталей під дією робочого тиску. При цьому зі зони контакту витісняються усі інгредієнти, що заважають міжмолекулярному зближенню – гази, окислені та забруднені ділянки. Оскільки швидкість зсуву окремих шарів розплаву відрізняється через нерівномірність розподілу температури та тиску, це викликає його перемішування, зокрема на поверхні сплавлення. Дифузія сегментів макромолекул, що відбувається при охолодженні з'єднання мало впливає на формування стику та має вторинний характер [16].

На підтвердження перемішування мікроб'ємів розплаву приводять фото перерізу стикового з'єднання шаруватого полімерного матеріалу, охолодженого на початковому етапі осадження (рис. 7, *a*). Насправді з фотографії видно, що шари полімерного матеріалу значно деформовані, але ніщо не свідчить про їх суттєве перемішування. Аналогічні роботи зі зварювання нагрітим інструментом встик кольорових шаруватих зразків термопластів проводили в ІЕЗ. На перерізі шаруватого зварного з'єднання (рис. 7, *б, в*) можна спостерігати, що всі шари основного матеріалу зразків повністю зберігають свою послідовність навіть у зовнішньому ґраті, змінюючи тільки товщину [2]. Отже, про якесь значне перемішування розплаву в процесі розплавлення та осадження говорити не можна.

Ю.С. Ліпатов з колегами досліджували специфіку міжфазних явищ у гетерогенних системах полімер – наповнювач та полімер – полімер [17]. Було відзначено, що полімери різних типів термодинамічно несумісні та не можуть утворювати спільні кристалічні форми. Однак різні полімери сумісні у морфологічному плані та при контакті у розплавленому стані формують спільні надмолекулярні структури – перехідний шар. Цей шар



утворюється як взаємною дифузією компонентів через межу розділу фаз, так і за рахунок адсорбції одного компонента на поверхні іншого.

Полімер являє собою суміш молекулярних ланцюгів різних розмірів. Теплові флуктуації на поверхні сплавлення призводять до диференціації молекул за розмірами та збагачення перехідної зони молекулами меншої ваги. Локальна дифузія через поверхню міжфазного контакту зазвичай відбувається на невелику глибину та формує перехідний шар товщиною декілька нанометрів. З іншого боку, у різних роботах фіксується наявність перехідних зон у з'єднаннях полімер-полімер товщиною 0,1...1,0 мкм. Вірогідно, в розплавах полімерів при підвищених температурах, разом зі звичайною дифузією за рахунок сегментальної рухливості макромолекул відбувається перенос через міжфазну межу досить значних об'ємів одного полімеру у міжструктурні області сусіднього.

На базі аналізу експериментальних даних Ю.С. Ліпатовим було розроблено модель поетапного утворення перехідної зони на межі контакту двох полімерів (рис. 8). На початковому етапі при контакті розплавлених поверхонь утворюється тонкий перехідний шар за рахунок конформаційних поворотів сегментів макромолекул. Якщо температура у зоні контакту деякий час залишається достатньо високою, настає другий етап, у якому під дією теплового руху через поверхню сплавлення переміщуються не тільки сегменти, а й цілі макромолекули у вигляді невеликих надмолекулярних об'єктів. У результаті замість первісного тонкого перехідного шару формується значно ширший шар, у якому мікрооб'єми одного полімеру занурюються в структуру іншого.

Аналогічні процеси, вочевидь, можуть відбуватися і при створенні зварного з'єднання між контактуючими поверхнями однакових полімерів. Якщо при з'єднанні різнотипних полімерів навіть

при утворенні широкого перехідного шару, завжди залишається явно виражена міжфазна поверхня, то у однотипних полімерів ця межа зникає та розмивається в процесі аутогезії та дифузії. На міцність зварного з'єднання впливають, головним чином, саме властивості цієї перехідної структури в зоні сплавлення.

Загальна теорія дифузії у будь-яких середовищах, зокрема в полімерах, розглядає цей процес як сукупність елементарних актів переміщення молекулярних часток. Зрозуміло, що для руху будь якої молекули або її фрагменту необхідний вільний простір, в який вона буде переміщена. Тому основою процесу дифузії вважається вакаційний (дірковий) механізм [18]. Елементарний акт дифузії являє собою утворення в результаті теплового руху поблизу молекули мікропорожнини («дірки») та їх наступний обмін місцями. У високомолекулярних полімерах мікропорожнини зазвичай утворюються за рахунок конформаційних поворотів окремих сегментів ланцюгів – так званих кінетичних сегментів. Відповідно висловлюють припущення, що утворення перехідної структури між полімерними деталями при зварюванні відбувається головним чином за рахунок сегментального взаємопроникнення макромолекул через поверхню з'єднання [19]. При цьому підкреслюється визначальна роль температури в зоні зварювання та робочого тиску, який забезпечує необхідний в'язкий контакт розплавлених поверхонь.

За результатами досліджень Ю.С. Ліпатова та вчених ІЕЗ було сформульовано конформаційну теорію зварних з'єднань полімерів [20]. В основі теорії лежить уявлення, що тепловий рух макромолекул відбувається в основному за рахунок конформаційних поворотів сегментів молекулярних ланцюгів, не поступальним переміщенням їх кінців. Тому розплавлення та кристалізацію полімеру слід розглядати як разупорядкування та наступне

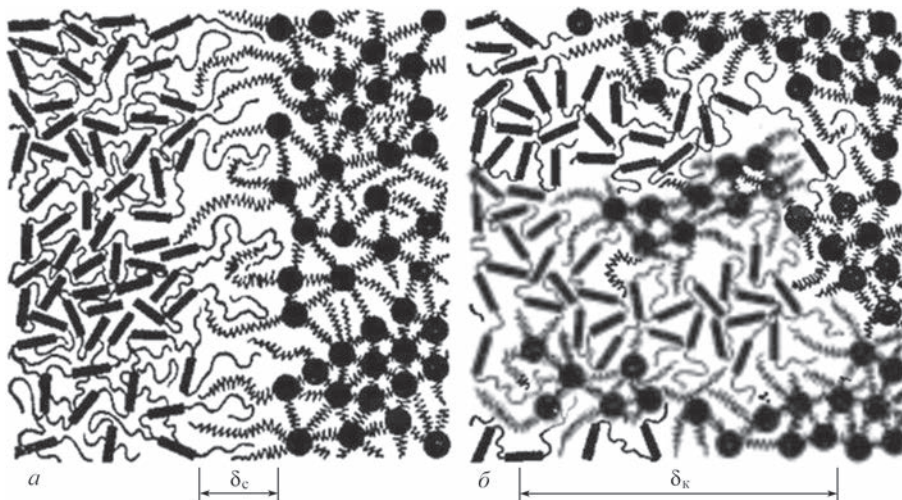


Рис. 8. Модель перехідного шару на межі розділу фаз між різними об'єктами: *а* – з урахуванням тільки сегментальної дифузії; *б* – при переміщенні структурних елементів [17]



упорядкування за конформаційним механізмом. Взаємопроникнення фрагментів макромолекул через поверхню з'єднання при зварюванні полімерів («заліковування» межі розподілу) також відбувається за рахунок молекулярних конформаційних поворотів. Дифузія макромолекул поступальним рухом їх кінців крізь поверхню з'єднання практично не впливає на процес «заліковування» через короткоплинність зварювання та невелику кількість вільних кінців молекулярних ланцюгів у порівнянні з кількістю сегментальних атомарних груп, що здатні до конформації.

Також, було припущено, що визначальний вплив на кінцеву кристалічну структуру полімеру, що формується зі розплаву має кількість зародків сферолітизації на поверхні сплавлення. Згідно з цим положенням було сформульовано критерій утворення якісного стикового зварного з'єднання полімерів. На рис. 9, а вздовж лінії сплавлення наявна оптимальна кількість зародків кристалітів. В результаті формується суцільна завершена сферолітна структура, рівномірна з основним полімерним матеріалом. На рис. 9, б показано випадок, коли теплофізичні умови при формуванні стику сприяли утворенню надмірної кількості зародків сферолітів. У результаті формується велика кількість дрібних незавершених сферолітів і так званий транскристалічний шар вздовж лінії сплавлення. Таке з'єднання має знижену механічну міцність та руйнується по лінії стику.

Останні дослідження, проведені в ІЕЗ, дозволили доповнити новими даними конформаційну теорію утворення зварних з'єднань полімерів [21, 22].

Показано, що на формування зварного з'єднання впливають два основні фактори – теплова енергія  $T$  та силове поле  $P$  (зовнішній тиск та інші фактори) (рис. 10). За підсумками комплексних досліджень структури та властивостей зварних з'єднань полімерів було припущено, що в тонкому шарі розплаву при зварюванні відбувається орієнтація макромолекул уздовж поверхні розмежування з наступним розмиванням цієї поверхні за рахунок обертальних рухів сегментів макромолекул, тобто зміни їх конформацій в об'ємі перехідного шару [23]. Запропонована концепція не заперечує можливість взаємної дифузії макромолекул полімерів, зокрема за рахунок рептації, однак вважається, що статистично конформаційні обертальні рухи сегментів макромолекул відбуваються значно частіше у порівнянні з дифузійними, тому мають вирішальний вплив на розмивання поверхні розмежування для короткотривалого процесу з'єднан-

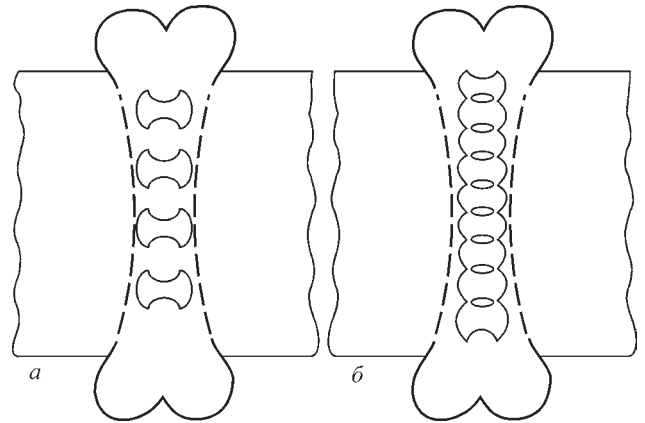


Рис. 9. Формування сферолітної структури вздовж лінії сплавлення полімерів [20]

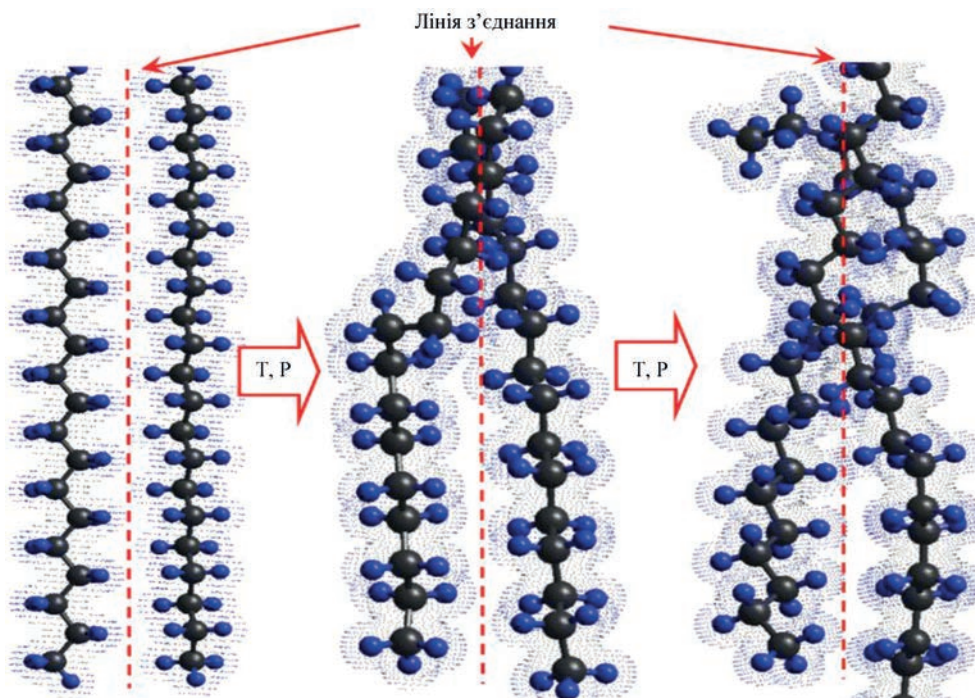


Рис. 10. Процес сегментальної рухливості зі зміною конформацій макромолекул під дією теплового та силового полів при зварюванні [23, 24]

ня (рис. 11), яким у більшості випадків є зварювання полімерів [2]. Основою процесу переміщення фрагментів макромолекул в розплаві при тепловому русі саме вакансійний (дірковий) механізм. Наявність таких вакансій в кристалічній структурі полімеру передбачає найбільш наближена до реальності паракристалічна модель Хоземанна [24].

Згідно з цією моделлю в структурі полімеру наявні порожнини, аморфні ділянки, монокристали, фрагменти розпрямлених ланцюгів та інші утворення. Після розплавлення або переходу у в'язкотекучий стан порожнини на молекулярному рівні залишаються, так само, як і деякі складчасті або неупорядковані утворення, здатні до конформаційних перетворень. На рис. 12 показано модель поступового зникнення межі розподілу при зварюванні полімерів за ваканційно-конформацій-

ним принципом. На етапі змочування та контакту розплавлених поверхонь ( $t = 0$ ) кількість вакансій є найбільшою саме поблизу площини контакту. Через деякий час ( $t > 0$ ) за рахунок теплового руху молекулярних сегментів (конформацій) вакансії на поверхні розмежування поступово заповнюються, переміщуючись вглиб матеріалу. Якщо полімерний матеріал перебуває у розплавленому стані деякий мінімально необхідний час, розподіл вакансій у розплаві стане майже рівномірним і межа розподілу «розмиється», зникне. Після твердіння гомогенного шару розплаву утворюється міцне суцільне зварне з'єднання. Цей мінімально необхідний час  $T_g$  назвемо часом гомогенізації.

Терміни «заліковування», «герметизація» для процесу зникнення поверхні розділу між однотипними розплавами полімерів, що контактують

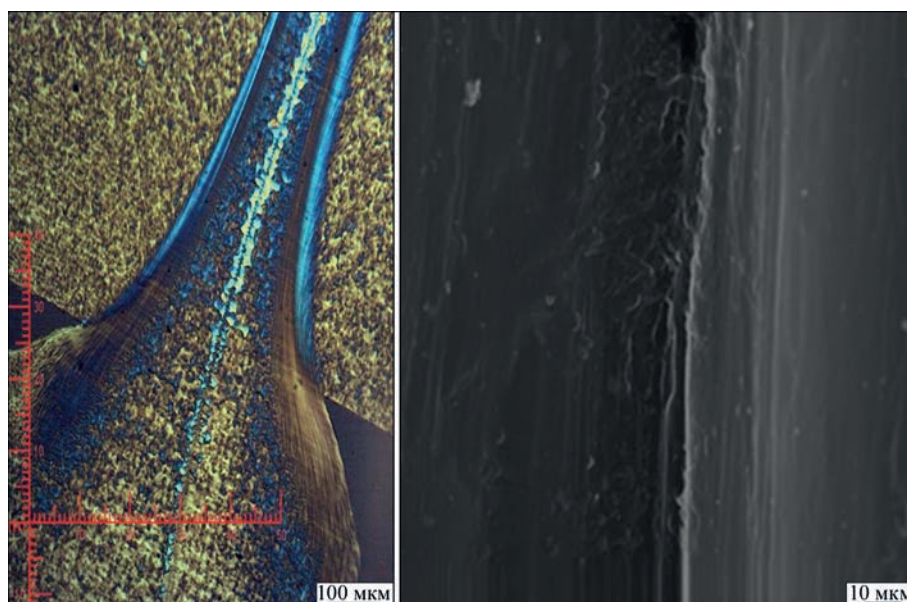


Рис. 11. Оптична та електронна мікроскопії зварних швів полімеру [25]

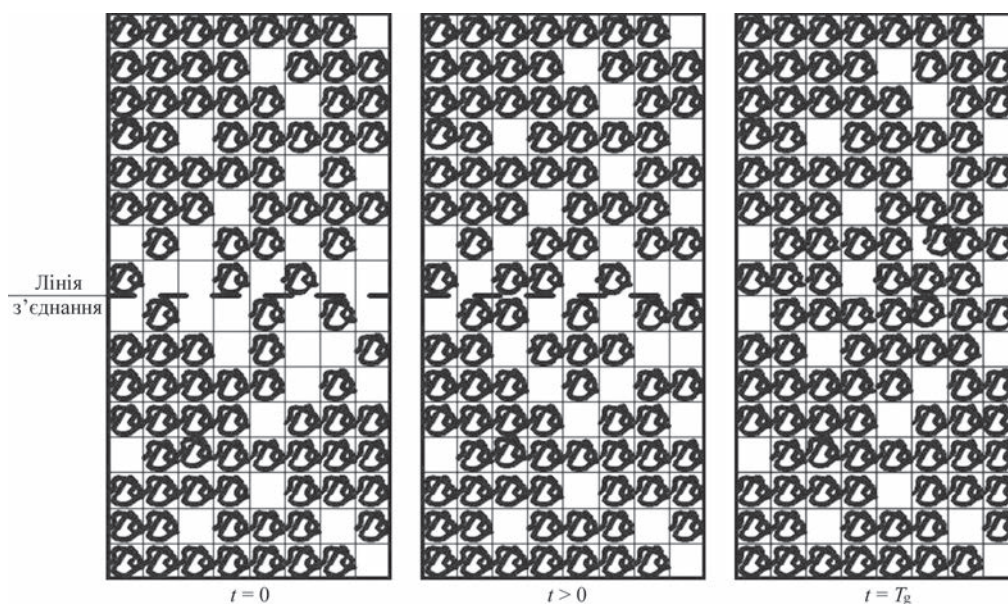


Рис. 12. Модель гомогенізації перехідного шару на межі розділу фаз при зварюванні полімерів за ваканційно-конформаційним принципом



ми вважаємо недостатньо точними. Насправді відбувається, хоча й неповне але вирівнювання об'ємно-просторових властивостей молекулярної будови розплавленого полімеру, розподіл фрагментів макромолекул стає більш однорідним, гомогенним. Тому, процес, що відбувається у тонкому шарі перехідної зони зварювання слід вважати вирівнюванням властивостей розплаву, тобто «гомогенізацією».

Вище було відзначено, що для формування кристалічного утворення при охолодженні розплаву полімеру, окремі молекулярні ланцюги повинні мати змогу переміщуватись у розплаві відносно своїх сусідів. Рух макромолекулярного ланцюга може мати дві форми: конформаційні повороти окремих частин молекули відносно власних хімічних зв'язків та поступальне переміщення ланцюга відносно загального молекулярного клубка. Обидва рухи можна розглядати як явище самодифузії, що ініціюється тепловими процесами.

Слід відзначити, що запропонована модель гомогенізації перехідного шару на межі розділу фаз при зварюванні полімерів за вакаційно-конформаційним принципом може бути доповнена розробкою математичної моделі для визначення придатних режимів зварювання різноманітних полімерних матеріалів.

## Висновки

1. Визначено, що процес зварювання пластмас як поступове зникнення на молекулярному рівні проміжку між деталями, що з'єднуються та формування між ними перехідного шару (зварного шва), структура якого міцна, однак суттєво відрізняється від структури основного полімерного матеріалу.

3. Сьогодні існує декілька теорій щодо природи та механізмів процесу зварювання пластмас, кожна з яких має непряме експериментальне обґрунтування, але не має узагальнюючого характеру. Тому в даний час актуальним є продовження дослідження структури і властивостей зварних з'єднань пластмас з метою отримання фундаментальних даних для доповнення теоретичних основ зварювання полімерних матеріалів.

3. Дискусійним питанням залишається можливість та механізм дифузії фрагментів молекулярного ланцюга, що є визначальним для розуміння механізму процесу зварювання полімерів. Вочевидь, для процесу «розмивання» межі розподілу при зварюванні полімерів замість поширеного визначення «заліковування» більш точним буде визначення «гомогенізація», тобто вирівнювання властивостей.

4. Існуючі на даний час моделі утворення зварних з'єднань полімерів беруть за основу різні фі-

зичні феномени – взаємну адгезію субстратів, дифузію макромолекул, реологію розплаву. Ми вважаємо найбільш реалістичною теорію утворення зварних з'єднань полімерів за рахунок конформаційних перетворень фрагментів макромолекул. У розвиток конформаційної теорії, що розробляється науковою школою ІЕЗ, запропоновано модель гомогенізації перехідного шару на межі розділу фаз при зварюванні полімерів за вакаційно-конформаційним принципом.

## Список літератури

1. Николаев Г.А. (1978) *Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х томах*. Москва, Машиностроение.
2. Патон Б.Є. (2018) *Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас*. Київ, Наукова думка.
3. Комаров Г.В. (2006) *Соединения деталей из полимерных материалов*. Москва, Профессия.
4. ISO 472:2013 *Plastics – Vocabulary*. Geneva.
5. Гришин Н.А., Воюцкий С.С., Гудимов М.М. (1957) *О механизме сваривания органических стекол*. Доклады Академии наук СССР, 116, 4, 629–632.
6. Воюцкий С.С. (1960) *Аутогезия и адгезия высокополимеров*. Москва, Ростехиздат.
7. Гришин Н.А. (1963) *Свариваемость термопластов. Высокмолекулярные соединения*, 3, 33–35.
8. Wool, R.P., O'Connor, K.M. (1981) A theory of crack healing in polymers. *Journal of Applied Physics*, 52, 10, 5953–5963.
9. Липатов Ю.С., Привалко В.П. (1976) О возможности складывания макромолекул в аморфных полимерах. *Высокомолекулярные соединения*, 18, А(5), 991–996.
10. Yeh, G.S.Y. (1972) A structural model for the amorphous state of polymers. Folded-chain fringed micellar grain model. *Journal of Macromolecular Science*, 6, 2, 3, 465–468.
11. Wool, R.P. (1995) *Polymer Interfaces: Structure and Strength*. Hanser Publishers.
12. Вольнский А.Л., Бакеев Н.Ф. (2009) Залечивание межфазной поверхности в полимерных системах. *Высокомолекулярные соединения*, серия А, 51, 10, 1783–1816.
13. Grevell, D. (2007) Welding of plastics: fundamentals and new developments. *International polymer processing*, XXII, 43–46.
14. Жен де П. (1982) *Идеи скейлинга в мире полимеров*. Москва, Мир.
15. Губенко С.И., Журавлев С.И., Коновалов Н.А. (2014) О физической природе возникновения дефектов типа «матовые пятна» при контактной сварке магистральных трубопроводов из феррито-перлитных сталей. *Металлофизика и новейшие технологии*, 36(5), 661–688.
16. Зайцев К.И. (1973) Механизм образования соединений при контактной сварке оплавлением. *Автоматическая сварка*, 9, 29–30.
17. Липатов Ю.С. (1977) *Физическая химия наполненных полимеров*. Москва, Химия.
18. Чалых А.Е. (1987) *Диффузия в полимерных системах*. Москва, Химия.
19. Комаров Г.В. (2015) Состав и свойства полимерных материалов, влияющие на их свариваемость. *Полимерные материалы*, 9, 44–48.
20. Гринюк В.Д., Шадрин А.А., Кораб Г.Н. (1992) Молекулярный механизм образования сварных соединений термопластичных материалов. *Автоматическая сварка*, 7–8, 33–36.
21. Galchun, A., Korab, N., Kondratenko, V. et al. (2015) Nano-structurization and thermal properties of polyethylenes' welds. *Nanoscale Research Letters*, 10, 138–144. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0832-4>
22. Demchenko, V., Iurzhenko, M., Shadrin, A. et al. (2017) Relaxation behavior of polyethylene welded joints. *Ibid*, 12, 280–285. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2059-z>
23. Iurzhenko, M. (2018) Novel theory of plastics welding and its application. *10<sup>th</sup> International conference Advanced Materials and Technologies: from idea to market*, 24–26 October 2018. Ningbo, China.



24. Hosemann, R. (1882) Dependence of the change in the free enthalpy on the lattice number with the formation of microparacrystals. *Colloid and Polymer Science*, **9**, 864–870.

## References

- Nikolaev, G.A. (1978) *Welding in machine-building: Handbook in 4 Vol.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Paton, B.E. (2018) *Dictionary and reference book on welding and gluing of plastics.* Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Komarov, G.V. (2006) *Connections of parts from polymer materials.* Moscow, Professiya [in Russian].
- ISO 472:2013 Plastics – Vocabulary. Geneva.
- Grishin, N.A., Voyutskii, S.S., Gudimov, M.M. (1957) On mechanism of welding of organic glasses. *Doklady AN SSSR*, **116(4)**, 629–632 [in Russian].
- Voyutskii, S.S. (1960) *Autohesion and adhesion of high polymers.* Moscow, Rostekhzdat [in Russian].
- Grishin, N.A., (1963) Weldability of thermoplasts. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya*, **3**, 33–35.
- Wool, R.P., O'Connor, K.M. (1981) A theory of crack healing in polymers. *J. of Applied Physics*, **52(10)**, 5953–5963.
- Lipatov, Yu.S., Privalko, V.P. (1976) On possibility of folding of macromolecules in amorphous polymers. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya*, **18, A(5)**, 991–996 [in Russian].
- Yeh, G.S.Y. (1972) A structural model for the amorphous state of polymers. Folded-chain fringed micellar grain model. *J. of Macromolecular Sci.*, **6, 2(3)**, 465–468.
- Wool, R.P. (1995) *Polymer Interfaces: Structure and Strength.* Hanser Publishers.
- Volynsky, A.L., Bakeev, N.F. (2009) Healing of interphase surface in polymer systems. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya, series A*, **51(10)**, 1783–1816 [in Russian].
- Grevell, D. (2007) Welding of plastics: Fundamentals and new developments. *Int. Polymer Processing*, **XXII**, 43–46.
- Gennes de P. (1982) Ideas of scaling in polymer world. Moscow, Mir [in Russian].
- Gubenko, S.I., Zhuravlev, S.I., Kononov, N.A. (2014) On physical nature of appearance of “dead spot” type defects in resistance welding of main pipelines from ferritic-pearlitic steels. *Metallofizika i Novejshe Tekhnologii*, **36(5)**, 661–688 [in Russian].
- Zajtsev, K.I. (1973) Mechanism of joint formation in flash butt welding. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 29–30 [in Russian].
- Lipatov, Yu.S. (1977) *Physical chemistry of filled polymers.* Moscow, Khimiya [in Russian].
- Chalykh, A.E. (2015) *Diffusion in polymer systems.* Moscow, Khimiya [in Russian].
- Komarov, G.V. (2015) Composition and properties of polymer materials affecting their weldability. *Polimernye Materialy*, **9**, 44–48 [in Russian].
- Grinyuk, V.D., Shadrin, A.A., Korab, G.N. (1992) Molecular mechanism of formation of thermoplastic material welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **7-8**, 33-36 [in Russian].
- Galchun, A., Korab, N., Kondratenko, V. et al. (2015) Nano-structurization and thermal properties of polyethylenes' welds. *Nanoscale Research Letters*, **10**, 138–144. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0832-4>
- Demchenko, V., Iurzhenko, M., Shadrin, A. et al. (2017) Relaxation behavior of polyethylene welded joints. *Ibid.*, **12**, 280–285. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2059-z>
- Iurzhenko, M. (2018) Novel theory of plastics welding and its application. In: *Proc. of 10<sup>th</sup> Int. Conf. Advanced Materials and Technologies: From Idea to Market (Ningbo, China, 24–26 October 2018)*.
- Hosemann, R. (1882) Dependence of the change in the free enthalpy on the lattice number with the formation of microparacrystals. *Colloid and Polymer Sci.*, **9**, 864–870.

## MODERN MODELS OF FORMATION OF POLYMER WELDED JOINTS MATERIALS (Review)

M.G. Korab, M.V. Yurzhenko, V.L. Demchenko, Ye.P. Mamunya

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The process of welding plastics is determined as a gradual disappearance of the boundary interface between parts to be joined and the formation of a transition layer between them, whose structure is significantly different from the structure of the base polymeric material. The models of formation of welded joints of polymers existing for today are based on different physical phenomena: mutual adhesion of substrates, diffusion of macromolecules and melt rheology. The most common is the diffusion model of macromolecules reptation in the welding zone, which many researchers refer to in order to explain experimental data. Without denying the possibility of progressive diffusion of elements of the molecular chain through the fusion surface, the position that this diffusion provides the main mass transfer during the formation of joints of welded polymers is considered to be controversial. The theory of the formation of welded joints of polymers due to conformational transformations of macromolecule fragments, being developed by the Scientific School of the PWI, is more realistic. In the development of this conformational theory, the model of homogenization of the transition layer at the boundary interface of the phases during welding of polymers is proposed based on a vacation and conformation principle. 24 Ref., 12 Fig.

**Keywords:** polymeric materials, welding, diffusion of macromolecules, conformational transformations

Надійшла до редакції 02.01.2023



## CUTTING WORLD 2023 – ВИСТАВКА ПРОФЕСІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РІЗАННЯ

25-27 квітня 2023, Ессен, Німеччина

Оцифровка є одним із основних напрямків Cutting World 2023. Цифровізація пропонує численні переваги, особливо для промисловості, будь-то оптимізація процесів, економія чи оптимізоване обслуговування клієнтів. Цифрові інновації допоможуть компаніям ідеально підготуватися до викликів і вимог їхнього бізнесу.

Експонент Tailor Steel, наприклад, зосереджується на покращенні обслуговування клієнтів завдяки оцифровці. TailorSteel є провідним європейським виробником нестандартного крою металевих листів, труб та окантовки. Завдяки порталу Sophia® клієнти можуть розмістити свої замовлення онлайн цілодобово, отримати ціну всього за одну хвилину та отримати продукцію протягом 48 годин.

На додаток до TailorSteel компанії Air Liquide, Boschert, ESAB, FICER, Hypertherm, Lantek, Maximator Jet, Mazak, Messer Cutting Systems і Voortman, які представляють свої продукти та послуги на Cutting World, звітують про свій досвід роботи з цифровими процесами.

Додаткову інформацію про виставку можна знайти на [www.cuttingworld.de](http://www.cuttingworld.de)

# ДОСЯГНЕННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДБУДОВИ УКРАЇНСЬКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ, НАУКИ ТА ІНЖИНІРИНГУ

*Надихаємо українську технологічну революцію*

Міжнародний інститут сучасних технологій (МІСТ) у співробітництві з Київським академічним університетом, проектом Academ.City та Міжнародним інститутом бізнесу 7-8 грудня 2022 р. в готелі «Національний» (м. Київ) провели україно-американську онлайн-конференцію «Досягнення адитивних технологій для відбудови української промисловості, науки та інжинірингу». Конференція була проведена за сприянням та участю спеціалістів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Тема події: найсучасніші досягнення адитивних технологій і 3D-друку та їх використання у відбудові української промисловості, інжинірингу та науки. У конференції прийняли участь кращі світові розробники технологій, виробники обладнання, програмного забезпечення та матеріалів, а також провідні українські фахівці даної галузі, які обговорили сучасні тренди у адитивних технологіях, останні досягнення в обладнанні та матеріалах, питання інженерної освіти для сучасних технологій 3D-друку, найновіші досягнення адитивних технологій у медицині. До участі в роботі конференції були запрошені українські промисловці, а також компанії, що вже працюють з технологіями 3D-друку, викладачі та студенти інженерних спеціальностей, інженери, зацікавлені у побудові кар'єри у галузі дизайну для сучасного виробництва.

Під час конференції було проведено чотири секції:

- Сучасні тренди в адитивних технологіях
- Останні досягнення у адитивних технологіях / 3D-прінтингу



- Інженерна освіта для адитивних технологій
- Новітні адитивні технології у медицині.

До пленарних виступів було залучено лідерів галузі, розробників обладнання та програмного забезпечення, представників провідних навчальних закладів і наукових установ. Зокрема, з доповідями виступили Юджин Геллер (PALITRA, США), Марк Абшир (Additive Manufacturing Users Group AMUG, США), Алекс Меджіріцкі (Formlabs Ohio, США), Калум Стюарт (SPEE3D, США), Омер Тюран (Stratasys, США), Дмитро Ковальчук (Червона Хвиля, Україна), Метью Крессі (MIT, США), Сергій Веретюк (Ноосфера, Україна), Керім Генк (Synopsys Simpleware division, США), Максим Русиник (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна), Юрій Богомол (Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського, Україна) та інші.

Під час конференції доповідачі та учасники обговорили сучасні тенденції в застосуванні 3D-друку та нові розробки апаратного та програмного забезпечення, матеріалів, а також актуальні питання наукових досліджень, інноваційної діяльності та інженерної освіти. Основним акцентом панельних дискусій були перспективи співпраці українських та американських компаній та спеціалістів в ключових аспектах розвитку адитивного виробництва в Україні.

За матеріалами сайту

<https://iimt.com.ua/3d-conference-2022>

*Заснований у 2022 р. та розташований у м. Києві, Міжнародний інститут сучасних технологій (МІСТ) є освітнім, дослідницьким та інженерним центром, який приносить найсучасніші інженерні та виробничі технології в Україну. МІСТ має на меті допомогти українським інженерам у використанні найсучаснішого програмного забезпечення і обладнання для виробництва, щоб допомогти відновити та розвинути українську промисловість. МІСТ – прямий шлях для українських інженерів на світовий ринок передових технологій. Програми МІСТ особливо зосереджені, але не обмежуються, технологіями адитивного виробництва. МІСТ об'єднує виробників обладнання, розробників програмного забезпечення, науковців, інженерів, бізнесменів, які зацікавлені в розвитку інженерного та виробничого потенціалу України.*

*Історія Київського академічного університету (КАУ) починається з Київського відділення Московського фізико-технічного інституту (КВ МФТІ), яке було створене за ініціативи Бориса Євгеновича Патона з метою забезпечити можливість українським студентам, що навчались в МФТІ, повертатись і працювати в Україні. У 1997 р. КВ МФТІ реорганізовано у Фізико-технічний навчально-науковий центр (ФТННЦ) НАН України, а у 2016 р. було утворено державну наукову установу «Київський академічний університет», за яким КАУ утворено шляхом реорганізації ФТННЦ НАН України.*





## УСПІШНЕ ПРОВЕДЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИСТАВОК В ІНДІЇ

*Wire India, Tube India, METEC India та India Essen Welding & Cutting знову довели інноваційні напрямки руху для своїх галузей.*

З 23 по 25 листопада 2022 р. Бомбейський конференц-центр і виставковий центр у Мумбаї знову стали місцем зустрічі для провідних регіональних виставок дротяної, кабельної та трубної промисловості, а також металургійного, зварювального та різального секторів. Чотири ярмарки із 400 експонентами з 21 країни представили сучасні технології, обладнання, готову продукцію та рішення для відповідних галузей протягом трьох виставкових днів. Крім індійських компаній більшість європейських експонентів прибуло з країн Бенілюксу, Австрії, Швейцарії, Німеччини, Італії, Великобританії, Скандинавії, Туреччини, Франції та Іспанії. Також приймали участь компанії з США, Канади, Таїланду, В'єтнаму, Тайваню, Південної Кореї, Сінгапуру, Південної Африки, Китаю та Ін-

дії. Крім того, на виставках брали участь національні спільні представники Швейцарії, Італії та Німеччини.

Виставки були доповнені насиченими програмами конференцій. Саміт металевої виставки знову був організований Messe Düsseldorf India у співпраці зі своїми міжнародними асоціаціями-партнерами IWCEA (Міжнародна асоціація учасників виставок дроту та кабелю), IWMA (Міжнародна асоціація дроту та обладнання), ACIMAF (Італійська асоціація виробників обладнання для дроту), WCISA (Асоціація постачальників дроту та кабелю) і ІТА (Міжнародна асоціація труб).

Індійські галузеві асоціації SWMAI (Асоціація виробників сталевого дроту Індії), AIWMA (Всеіндійська асоціація виробників зварних сіток), INSDAG (Інститут розвитку сталі) та SSPC India (Товариство захисних покриттів для поверхонь, Індія) знову підтримали ярмарки.

У 2024 р. виставковий квартет знову відбудеться в Бомбейському конференц-центрі, цього разу з 27 по 29 листопада.

[www.wire-india.com](http://www.wire-india.com), [www.tube-india.com](http://www.tube-india.com)  
[www.metec-india.com](http://www.metec-india.com), [www.iewc.in](http://www.iewc.in)



## ЧИННІ ПАТЕНТИ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАНУ НА ВИНАХОДИ\*

Номер патенту	Номінальний строк дії (до)	Назва	Автори	Призначення
87556	28.08.2027	ПЛАЗМОВИЙ ІНСИ- НЕРАТОР	Маринський Георгій Сергійович, Петров Станіслав Володимирович, Коржик Володимир Миколайович, Чернець Олександр Владиславович, Волков Сергій Симонович, Романюк Валерій Степанович, Волков Володи- мир Сергійович	Пристрій призначений для утилізації органічних та інших небезпечних відходів медичної галузі з одночасним одержанням теплової енергії для зовнішнього використання.
88564	17.03.2028	СПОСІБ ЕЛЕК- ТРОННО-ПРОМЕ- НЕВОГО ОПЛАВ- ЛЕННЯ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ЗЛИВКА ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА	Тригуб Микола Петрович, Жук Ген- надій Віліорович, Березос Володимир Олександрович	Спосіб призначений для обробки поверхні циліндричних зливків тугоплавких матеріалів (напри- клад, заготовок для прокату, полу- фабрикатів), отриманих будь-яким способом виплавлення, в металур- гійних установках з джерелами енергії поверхневої дії, наприклад, електронно-променевих
88686	09.10.2027	ПОРОШКОВИЙ ДРИТ ДЛЯ НАПЛАВ- ЛЕННЯ ПІД ФЛЮ- СОМ	Рябцев Ігор Ігорович, Міщенко Дмитро Дмитрович, Рябцев Ігор Олександро- вич, Токарев Володимир Сергійович, Кусков Юрій Михайлович, Жданов Леонід Альбертович, Сокольський Володимир Емануїлович	Продукт призначений для вико- ристання при багатошаровому дуговому наплавленні під флюсом робочих поверхонь деталей, що працюють в умовах тертя металу по металу без змащення, напри- клад, роликів рольгантів, різних осей, валів, кранових коліс і т. інше
89405	28.11.2027	МАШИНА ДЛЯ СТИКОВОГО ЗВА- РЮВАННЯ ТРУБ	Кучук-Яценко Сергій Іванович, Качин- ський Володимир Станіславович, Га- лян Борис Опанасович, Коваль Микола Йосипович, Мирошніченко Олександр Петрович, Ігнатенко Вадим Юрійович, Левчук Андрій Миколайович	Пристрій призначений для використання у різних галузях промисловості та будівництва при зварюванні трубчастих деталей різноманітного призначення і кон- фігурації: перш за все, машинобу- дівні підприємства, будівництво тепліць, прокладання трубопро- водів різноманітного призначення
89553	11.03.2028	ФЛЮС ДЛЯ ДУГО- ВОГО ЗВАРЮ- ВАННЯ СТАЛЕЙ ВОЛЬФРАМОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ У СЕ- РЕДОВИЩІ ІНЕРТ- НИХ ГАЗІВ	Ющенко Костянтин Андрійович, Кова- ленко Дмитро Васильович, Коваленко Ігор Васильович	Продукт призначений для дугово- го зварювання сталей та сплавів вольфрамовим електродом у середовищі інертних газів, може бути використаним при однопро- хідному та багатопрхідному руч- ному й автоматичному зварюванні відповідальних виробів у машино- будуванні
91251	22.06.2028	СПОСІБ ОДЕРЖАН- НЯ ЛЕГОВАНИХ АЛЮМІНІЄМ ТИТА- НОВИХ ЗЛИВКІВ	Тригуб Микола Петрович, Жук Геннадій Віліорович, Березос Воло- димир Олександрович, Фесан Андрій Анатолійович, Самофалов Олексій Валентинович	Спосіб призначений для одержан- ня високоякісних зливків сплавів на основі титану з регламентова- ним вмістом алюмінію в вакуум- них металургійних установках
92609	05.12.2027	СПОСІБ ЦЕНТРУ- ВАННЯ ДВОХ ПРО- ФІЛЬНИХ ЗАГО- ТОВОК, ЗОКРЕМА, РЕЙОК, У МАШИНІ ДЛЯ КОНТАКТНО- ГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ	Кучук-Яценко Сергій Іванович, Кривонос Вадим Петрович, Микитин Ярослав Іванович, Дедюх Володимир Іванович	Спосіб призначений для забезпе- чення суміщення осей профіль- них заготовок при центруванні у машині для контактного стикового зварювання

\*Перелік чинних патентів України на винаходи, одноосібним власником яких є Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України станом на 01.01.2023 (матеріал підготувала Ірина Бернадська, к.т.н., патентний повірений України).



95393	10.05.2030	СПОСІБ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА РОБОЧУ ПОВЕРХНЮ МІДНИХ ВИРОБІВ	Доценко Ігор Володимирович, Теплюк Віктор Михайлович, Зеленін Віталій Іванович, Лебединський Андрій Львович, Кавуненко Петро Михайлович, Паустовський Олександр Васильович, Полешук Михайло Анатолійович, Кириленко Степан Миколайович	Спосіб призначений для нанесення захисних покриттів на поверхні виробів, зокрема, для ремонту мідних виробів, приміром, для відновлення робочих поверхонь кристалізаторів для безперервного розливання сталі
95541	17.01.2030	СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ТИГЛІВ, ПОСУДИН, ТРУБ ТА ПРОФІЛЬОВАНИХ ВИРОБІВ З ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРІАЛІВ З МОНОКРИСТАЛІЧНОЮ, ПОЛІКРИСТАЛІЧНОЮ ТА ПЕВНОЮ СТРУКТУРОЮ	Шаповалов Віктор Олександрович, Колесніченко Володимир Іванович, Гніздило Олександр Миколайович, Якуша Володимир Вікторович, Карускевич Ольга Віталіївна	Спосіб призначений для отримання тиглів, посудин, труб та профільованих виробів з тугоплавких матеріалів з монокристалічною та полікристалічною структурою для застосування в агресивних середовищах, при контакті з лужними розплавами та рідкими тугоплавкими матеріалами
98548	28.10.2030	ПРИПІЙ ДЛЯ ПАЯННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ	Максимова Світлана Василівна, Хорунов Віктор Федорович, Іванченко Володимир Григорович	Продукт призначений для паяння відповідальних виробів і конструкцій з титанових сплавів
98549	28.10.2030	ПРИПІЙ ДЛЯ ПАЯННЯ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ	Хорунов Віктор Федорович, Максимова Світлана Василівна, Бутенко Юрій Васильович, Малий Олексій Борисович	Продукт призначений для паяння відповідальних виробів і конструкцій з жароміцних сплавів
99910	23.01.2031	СПОСІБ ЦЕНТРУВАННЯ РЕЙОК У МАШИНІ ДЛЯ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ	Кучук-Яценко Сергій Іванович, Кривонос Вадим Петрович, Дідковський Олександр Володимирович, Микитин Ярослав Іванович, Дедюх Володимир Іванович, Окул Віктор Іванович	Спосіб призначений для забезпечення швидкого і стабільного центрування зварюваних заготовок
100284	31.01.2031	ПОРОШКОВИЙ ДРІТ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ СТАЛЕЙ ВОЛЬФРАМОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ У СЕРЕДОВИЩІ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ	Ющенко Костянтин Андрійович, Коваленко Дмитро Васильович, Коваленко Ігор Васильович, Фадєєва Галина Вікторівна, Каховський Юрій Миколайович, Бабич Олександр Анатолійович, Каховський Микола Юрійович, Супрун Сергій Олександрович	Продукт призначений для дугового зварювання вольфрамовим електродом у середовищі інертних газів переважно високолегованих хромонікелевих сталей, і може бути використаний при однопрохідному та багатопрохідному ручному й автоматизованому зварюванні відповідальних виробів у машинобудуванні для потреб атомної енергетики, хімічної промисловості
100287	14.02.2031	ЕЛЕКТРОДНЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ РІЗНОРІДНИХ СТАЛЕЙ	Ющенко Костянтин Андрійович, Булат Олександр Володимирович, Каховський Юрій Миколайович, Самойленко Віктор Іванович, Фадєєва Галина Вікторівна, Косенко Петро Олексійович, Каховський Микола Юрійович, Ющенко Андрій Костянтинович, Поташик Семен Ізраїлевич, Рассовський Вадим Леонідович, Дубицький Юрій Іванович, Василенко Віктор Іванович, Пашенко Олег Григорович	Продукт призначений для виробництва високоспеціалізованих електродів для ремонту камери робочого колеса гідротурбін
100750	24.01.2031	ЕЛЕКТРОДНЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ МОКРОГО ПІДВОДНОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ТИПУ 18-10	Ющенко Костянтин Андрійович, Булат Олександр Володимирович, Каховський Микола Юрійович, Максимов Сергій Юрійович, Фадєєва Галина Вікторівна, Каховський Юрій Миколайович, Самойленко Віктор Іванович	Продукт призначений для виробництва електродів для ручного дугового мокрого підводного зварювання, переважно корозійностійких високолегованих хромонікелевих сталей типу 18-10
101539	07.07.2031	МАШИНА ДЛЯ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ РЕЙОК	Кучук-Яценко Сергій Іванович, Кривенко Валерій Георгійович, Дідковський Олександр Володимирович, Харченко Олександр Кирилович, Левчук Андрій Миколайович	Машина призначена для зварювання як окремих рейок, так і довгих рейкових секцій з попереднім натягом, а також для ремонту рейкових колій в польових умовах

102807	09.01.2033	КОНСТРУКЦІЯ ПЕРЕТВОРЮВАНОГО ОБ'ЄМУ	Лобанов Леонід Михайлович, Волков Валентин Сергійович, Волков Сергій Симонович	Оболонкові конструкції з замкнених кінцевих елементів з радіально гофрованими поверхнями призначені для створення штучного простору, придатного для перебування та/або роботи людей в екстремальних, небезпечних, позаземних умовах
103963	22.07.2032	РЕАКТИВНИЙ ФЛЮС ДЛЯ ПАЯННЯ АЛЮМІНІЮ ТА ЙОГО СПЛАВІВ	Сабадаш Олег Михайлович, Хорунов Віктор Федорович, Андрійко Олександр Опанасович	Продукт призначений для високотемпературного паяння алюмінію та його сплавів з малим вмістом магнію без присаджування припою у будь-якому вигляді (покриття, дріт, порошок, пари металу та інше) і може бути використаний в різних галузях промислового виробництва виробів з алюмінію та його сплавів, у т.ч. для паяння тонкостінних алюмінієвих конструкцій, які не піддаються пайці іншими способами
105408	04.07.2032	СПОСІБ ПІДВЕДЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ ДО ЗВАРЮВАНИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ КОНТАКТНО-СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ДОВГОМІРНИХ РЕЙКОВИХ ПЛІТЕЙ З НАТЯГОМ	Кучук-Яценко Сергій Іванович, Кривенко Валерій Георгійович, Дідковський Олександр Володимирович, Харченко Олександр Кирилович, Левчук Андрій Миколайович	Спосіб призначений для підведення зварювального струму до зварюваних деталей, і може бути використаний при контактному-стиковому зварюванні довгомірних рейкових плітей з натягом
106118	23.09.2032	СПОСІБ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ У СЕРЕДОВИЩІ ЗАХИСНИХ ГАЗІВ	Савицький Михайло Михайлович, Савицький Олександр Михайлович, Ващенко Володимир Миколайович, Шкрабалюк Юрій Миколайович	Спосіб призначений для однопрохідного автоматизованого, включно з запрограмованими технологічними циклами герметизації стику, нанесення селективного активуючого флюсу і наступного зварювання, одностороннього дугового зварювання неповоротного кільцевого або прямолінійного стику без скосу кромки при зварюванні металів і сплавів у різних просторових положеннях
106293	20.12.2032	СПОСІБ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ, ПАЯННЯ АБО ПЕРЕПЛАВУ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З МОДУЛЯЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ	Патон Борис Євгенович, Сидорук Володимир Степанович, Максимов Сергій Юрійович, Клочко Роман Ігорович, Кражановський Денис Миколайович	Винахід призначений для вдосконалення відомого способу механізованого дугового зварювання та наплавлення з модуляцією швидкості подавання електроду і з регулюванням дуги, а також для розширення області застосування такого способу на електрошлакові технології – зварювання, наплавлення, переплав
106513	25.07.2032	СПОСІБ З'ЄДНАННЯ ЗВАРЮВАННЯМ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН ЛЮДЕЙ І ТВАРИН З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНОГО СТРУМУ	Патон Борис Євгенович, Ткаченко Віктор Аркадійович, Маринський Георгій Сергійович, Подпратов Сергій Євгенович, Чернець Олександр Владиславович, Чвертко Наталія Анатоліївна, Дубко Андрій Григорович, Васильченко Валерій Андрійович, Сидоренко Дмитро Федорович, Лебедев Олексій Володимирович, Ткаченко Сергій Вікторович, Подпратов Сергій Сергійович, Матвійчук Георгій Миколайович	Спосіб призначений для з'єднання зварюванням біологічних тканин людей і тварин за допомогою біполярного електрохірургічного інструменту з використанням високочастотного струму, що проводиться в декілька послідовних взаємопов'язаних стадій
106954	17.12.2033	ЕЛЕКТРОДНЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ І НАПЛАВЛЕННЯ ОЛОВ'ЯНИХ БРОНЗ	Ілюшенко Валентин Михайлович, Майданчук Тарас Борисович, Аношин Валерій Опанасович, Скорина Микола Віталійович	Продукт призначений для виготовлення електродів для дугового зварювання деталей і конструкцій з олов'яних бронз та для наплавлення даних бронз на сталь



107229	20.12.2032	ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СХИЛЬНОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ДО КОРОЗІЙНОГО РОЗТРИСКУВАННЯ ВІД НАПРУЖЕННЯ	Ниркова Людмила Іванівна, Рибаків Анатолій Олександрович, Осадчук Світлана Олексіївна, Гапула Наталія Олексіївна, Мельничук Сергій Леонідович, Яковенко Георгій Миколайович	Пристрій призначений для проведення корозійних випробувань труб на розтріскування від напружень
107301	16.12.2033	СПОСІБ ВІДНОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ	Гайворонський Олександр Анатолійович, Позняков Валерій Дмитрович, Клапатюк Андрій Васильович	Спосіб призначений для відновлення виробів з високовуглецевих сталей, що гартуються, з вмістом вуглецю 0,44-0,75 %, також може бути використаний при ремонті виробів, які мають експлуатаційні пошкодження робочих поверхонь
107381	20.12.2032	СПОСІБ ВИПРОБУВАНЬ СХИЛЬНОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ДО КОРОЗІЙНОГО РОЗТРИСКУВАННЯ ВІД НАПРУЖЕННЯ ЗА ВПЛИВУ ЗМІННОГО ЗМОЧУВАННЯ	Ниркова Людмила Іванівна, Рибаків Анатолій Олександрович, Осадчук Світлана Олексіївна, Гапула Наталія Олексіївна, Мельничук Сергій Леонідович	Спосіб призначений для проведення корозійних випробувань труб на розтріскування від напружень в умовах, що моделюють реальні
107847	14.03.2033	БАЛОН ВИСОКОГО ТИСКУ, У ЯКОМУ ЦИЛІНДРИЧНИЙ КОРПУС МАЄ ОБЛОНКОВУ КОНСТРУКЦІЮ	Письменний Олександр Семенович, Савицький Михайло Михайлович, Письменний Олексій Олександрович, Савицький Олександр Михайлович, Прокоф'єв Олексій Сергійович, Губатюк Руслан Сергійович, Юхименко Роман Вікторович, Супруненко Володимир Олександрович, Мужиченко Олександр Федорович, Шинкаренко Артем Сергійович	Винахід призначено для вдосконалення конструкції оболонкових багатошарових корпусних посудин (балонів спеціального призначення)
108460	20.07.2034	ЕЛЕКТРОДНЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ АЛЮМІНІСВИХ БРОНЗ	Ллюшенко Валентин Михайлович, Аношин Валерій Опанасович, Майданчук Тарас Борисович, Скорина Микола Віталійович, Вавілов Олександр Васильович, Кантор Олександр Геннадійович	Продукт призначений для виготовлення електродів для зварювання відповідальних деталей і вузлів, що працюють у корозійному середовищі
110273	11.05.2034	СПОСІБ УСУНЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ІЗ АЛЮМІНІСВИХ СПЛАВІВ	Лобанов Леонід Михайлович, Пашин Микола Олександрович, Півторак Вячеслав Автономович, Волков Сергій Симонович	Спосіб призначений для технологічного забезпечення поточного виробництва відповідальних зварних конструкцій (елементи жорсткості, стрінгерні панелі, вертикальні кільцеві шви тощо)
110556	18.06.2034	СПОСІБ РУЧНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АБО НАПЛАВЛЕННЯ МОДУЛЬОВАНИМ СТРУМОМ З КЕРУВАННЯМ ПАРАМЕТРАМИ ДУГИ	Максимов Сергій Юрійович, Сидорук Володимир Степанович, Коротинський Олександр Євтихийович, Колесник Георгій Фомич, Кражановський Денис Миколайович, Захарченко Сергій Анатольович	Спосіб призначений для вдосконалення і розширення технологічних можливостей ручного дугового зварювання або наплавлення модульованим струмом з використанням плавких, у т.ч. покритих, та неплавких електродів
111002	18.06.2034	ВИСОКОМІЦНИЙ ТИТАНОВИЙ СПЛАВ	Ахонін Сергій Володимирович, Березос Володимир Олександрович, Білоус Валерій Юрійович, Пікулін Олександр Миколайович, Петриченко Ірина Константинівна, Селін Роман Володимирович, Єрохін Олексій Геннадійович	Сплав призначений для виготовлення відповідальних виробів (кріпильні засоби, вали тощо), які використовуються у авіації, енергетиці, хімічній та машинобудівній галузях, оборонній промисловості.
111026	20.11.2034	СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛЕВОГО ПОДОВОГО ЕЛЕКТРОДА	Шевцов Віктор Львович, Шевцов Олексій Вікторович, Богаченко Олексій Георгійович, Фрідман Михайло Олександрович, Лакомський Вадим Вікторович, Полещук Михайло Анатолійович, Пузрін Олександр Леонідович, Атрошенко Мирон Григорович, Григоренко Георгій Михайлович	Спосіб призначений для виготовлення подових електродів плавильних печей, плавлення металу у яких здійснюється в футерованій вогнетривкими неелектропровідними матеріалами у ванні, через дно якої пропущений подовий електрод

111268	03.09.2034	БАЛОН КОМБІНОВАНИЙ	Кулик Віктор Михайлович, Савицький Михайло Михайлович, Супруненко Володимир Олександрович	Винахід призначений для вдосконалення конструкції балонів для природного газу (пального) і попередження їх катастрофічної руйнації
113883	12.01.2035	СПОСІБ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО МЕХАНІЗОВАНОГО ЗВАРЮВАННЯ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ТА/АБО ПОХИЛОМУ ПОЛОЖЕННЯХ З ІМПУЛЬСНИМ САМОРЕГУЛЮВАННЯМ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА	Патон Борис Євгенович, Максимов Сергій Юрійович, Сидорук Володимир Степанович	Спосіб призначений для розширення технологічних властивостей механізованого дугового зварювання, зокрема, щодо зварювання у вертикальному та/або похилому положенні
116022	14.12.2035	МАШИНА ДЛЯ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ РЕЙОК	Кучук-Яценко Сергій Іванович, Кривенко Валерій Георгійович, Дідковський Олександр Володимирович, Коваль Микола Йосипович, Левчук Андрій Миколайович	Машина призначена для контактного стикового зварювання рейок, і може використовуватися як при зварюванні окремих рейок, так і при ремонті рейкових колій в польових умовах та у важкодоступних місцях, зокрема хрестовини, колії метрополітену, рейки, які пролягають поряд одна біля одної на близькій відстані тощо
116490	29.06.2036	МАШИНА ДЛЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ	Кучук-Яценко Сергій Іванович, Качинський Володимир Станіславович, Галахов Микола Вікторович, Коваль Михайло Павлович, Клименко Володимир Іванович	Машина призначена для пресового зварювання труб з нагріванням дугою, керованою магнітним полем
117033	28.04.2036	СПОСІБ ЗВАРЮВАННЯ У СТИК ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ БЕЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНІЧНОГО ТОРЦЮВАННЯ ТА БЕЗ УТВОРЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ГРАТА ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ	Юрженко Максим Володимирович, Кораб Микола Георгійович, Гальчун Анатолій Миколайович, Кондратенко Володимир Юрійович, Шадрін Андрій Олександрович	Технологія призначена для прокладання, виготовлення і ремонту трубопроводів з труб, вироблених із полімерних матеріалів, зокрема поліетилену
118388	22.02.2037	СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ЗЛИВКІВ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ	Ахонін Сергій Володимирович, Пікулін Олександр Миколайович, Березос Володимир Олександрович, Северин Андрій Юрійович, Єрохін Олексій Геннадійович	Спосіб призначений для одержання в установках з поверхневими джерелами енергії високоякісних зливків титанових сплавів, які є хімічно однорідними по довжині та по перерізу
118455	17.04.2036	СПОСІБ ЗВАРЮВАННЯ КОРЕНЕВОГО ШВА СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ	Хаскін Владислав Юрійович, Кривцун Ігор Віталійович, Коржик Володимир Миколайович, Гринюк Андрій Андрійович, Пелешенко Святослав Ігорович, Шевченко Віталій Єфимович, Ткачук Василь Іванович, Бабич Олександр Анатолійович	Спосіб призначений для багатопрохідного дугового або лазерного стикового зварювання сталей і сплавів з розробкою крайок, що нещільно прилягають
118895	19.03.2037	СПОСІБ НАНЕСЕННЯ НІКЕЛЕВОГО ПОКРИТТЯ НА ТИТАН І ЙОГО СПЛАВИ	Максимова Світлана Василівна, Воронов Віталій В'ячеславович, Ковальчук Петро Васильович, Лозбін Дмитро Вікторович	Спосіб призначений для нанесення нікелевих покриттів електролітичним способом на вироби з титану і його сплавів типу ВТ1-0, ВТ6, ВТ22, для подальшого високотемпературного паяння, включаючи вакуумне
119190	09.07.2037	ПРИПІЙ ДЛЯ ПАЯННЯ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ	Максимова Світлана Василівна, Воронов Віталій В'ячеславович, Ковальчук Петро Васильович, М'ясоїд Володимир Володимирович	Продукт призначений для паяння та ремонту лопаток газотурбінних двигунів та інших деталей, що експлуатуються в умовах високих температур

119396	12.11.2037	ПРИПІЙ ДЛЯ ПАЯННЯ РІЗНОРІДНИХ З'ЄДНАНЬ МОЛІБДЕН-НЕРЖАВІЮЧА СТАЛЬ	Максимова Світлана Василівна, Воронів Віталій В'ячеславович, Ковальчук Петро Васильович	Продукт призначений для паяння різнорідних з'єднань молібден-нержавіюча сталь для виготовлення вузлів відповідального призначення
119486	22.06.2037	ПЛАСТИНЧАСТИЙ ЕЛЕКТРОД З ФЛЮСОВИМ ПОКРИТТЯМ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АБО НАПЛАВЛЕННЯ	Максимов Сергій Юрійович, Сидорук Володимир Степанович, Галініч Володимир Іларіонович	Продукт призначений для використання при механізованому дуговому зварюванні або наплавленні у вертикальному та/або похилому положенні
119708	19.11.2037	СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ АДАПТЕРА МАГНІТНОЇ ПЛИТИ МЕТАЛООБРОБНОГО ВЕРСТАТА	Полещук Михайло Анатолійович, Атрошенко Мирон Григорович, Григоренко Георгій Михайлович, Шевцов Олексій Вікторович, Пузрін Олександр Леонідович, Бородін Анатолій Іванович, Серебряник Ілля Павлович	Спосіб призначений для виготовлення адаптерів магнітних пристроїв, і може бути використаний для закріплення феромагнітних деталей на робочих столах металообробних верстатів (шліфувальні верстати без лещат)
119931	12.12.2037	СПОСІБ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ	Протоковілов Ігор Вікторович, Шаповалов Віктор Олександрович, Назарчук Олександр Тарасович, Порохонько Віталій Богданович	Спосіб призначений для виплавки зливків металів і сплавів, зокрема прецизійних сплавів, багатокомпонентних сплавів, сплавів, схильних до ліквіації та інших
120280	18.06.2037	СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ПІДСИЛЕНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ПІДСИЛЕНА ОБОЛОНКОВА КОНСТРУКЦІЯ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	Лобанов Леонід Михайлович, Волков Сергій Симонович, Підлісний Олександр Степанович, Черніков Валерій Петрович	Спосіб призначений для удосконалення технологічних і конструктивних характеристик оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки до рівня можливостей їх багатофункціонального використання в задачах аерокосмічного транспортування і забезпечення позаземної присутності, зокрема при вирішенні задач побудови споруд тривалого використання на поверхні Місяця
120305	12.12.2037	ДЖЕРЕЛО СТРУМУ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ АБО ПАЯННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ	Колесник Георгій Фомич, Сидорук Володимир Степанович, Максимов Сергій Юрійович, Жук Геннадій Володимирович	Пристрій призначений для ручного дугового зварювання, наплавлення або паяння
120649	30.11.2037	ГОРИЗОНТАЛЬНИЙ ОБЕРТАЧ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТРУБНИХ КОНСТРУКЦІЙ	Лобанов Леонід Михайлович, Водозазкий Валерій Євгенович, Махлін Наум Мордухович, Коротинський Олександр Євтіхіївч, Жерносеків Анатолій Максимович, Попов В'ячеслав Євгенович, Скопюк Михайло Іванович	Пристрій призначено для виконання дуговим зварюванням поворотних кільцевих швів довгомірних деталей трубних конструкцій діаметром від 7 до 200 мм
121773	12.12.2037	СПОСІБ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОГО РОБОЧОГО ВАКУУМУ В ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ГАРМАТІ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВІДКРИТОМУ КОСМОСІ	Лобанов Леонід Михайлович, Асніс Юхим Аркадійович, Терновий Євген Георгійович, Зубченко Юрій Васильович, Перепеченко Борис Іванович, Харківська Тетяна Миколаївна, Шулим Віктор Федорович, Статкевич Ігор Іванович, Глушак Сергій Олександрович, Лікаренко Тарас Олександрович	Спосіб призначений для використання у ручних або автоматизованих інструментах для виконання монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт в умовах відкритого космосу, наприклад, засобами зварювання, різання, паяння та ін.
121792	28.05.2038	СПОСІБ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОГО ФОРМОЗМІНЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ І ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ	Лобанов Леонід Михайлович, Волков Сергій Симонович	Спосіб призначений для вдосконалення технології ротаційного гофрування замкнених конічних поверхонь



122077	17.05.2038	СПОСІБ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ АБО ПАЯННЯ З ІМПУЛЬСНИМ САМОРЕГУЛЮВАННЯМ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ	Патон Борис Євгенович, Сидорук Володимир Степанович, Максимов Сергій Юрійович, Кражанівський Денис Миколайович, Коротинський Олександр Євтіхійович, Скопюк Михайло Іванович, Драченко Микола Петрович, Люшенко Валентин Михайлович	Винахід призначений для вдосконалення відомого способу дугового зварювання, наплавлення або паяння плавким електродом
122355	26.06.2038	СПОСІБ ДИСТАНЦІЙНОЇ ПАСИВНОЇ ТЕПЛОВОЇ ДІАГНОСТИКИ ВАЖКОДОСТУПНИХ ТА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ	Троїцький Володимир Олександрович, Бондаренко Олександр Гнатович, Глуховський Віктор Юрійович	Спосіб призначений для пасивної теплової діагностики прихованих дефектів при дистанційному діагностуванні технічного стану важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів (труби висотою до 6-8 м, домни, градирні, споруди теплових електростанцій)
122452	05.02.2039	РЕАКТИВНИЙ ФЛЮС ДЛЯ ПАЯННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	Сабадаш Олег Михайлович, Максимова Світлана Василівна, Ковальчук Павло В'ячеславович, Богатирьов Микола Миколайович	Продукт призначений для високо-температурного паяння алюмінієвих сплавів з малим вмістом магнію без присаджування припою, і може бути використаний в різних галузях промислового виробництва
122829	16.01.2039	СПОСІБ УСУНЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ В ЗОНАХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ	Лобанов Леонід Михайлович, Кондратенко Ігор Петрович, Пашин Микола Олександрович, Волков Сергій Симонівич	Спосіб належить до методів зменшення деформацій та напружень від зварювання і призначений для технологічного забезпечення поточного виробництва відповідальних зварних конструкцій (елементи жорсткості, стрінгерні панелі, вертикальні кільцеві шви тощо)
122834	24.02.2039	СПОСІБ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ АБО ПАЯННЯ З ІМПУЛЬСНИМ САМОРЕГУЛЮВАННЯМ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА, З ПРОГРАМУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ	Сидорук Володимир Степанович, Максимов Сергій Юрійович, Кражанівський Денис Миколайович	Спосіб призначений для вдосконалення технологічного процесу дугового зварювання, наплавлення або паяння плавким електродом з імпульсним саморегулюванням процесу
122930	05.02.2039	ПРИПІЙ ДЛЯ ПАЯННЯ МОЛІБДЕНУ З НЕРЖАВІЮЧОЮ СТАЛЛЮ	Максимова Світлана Василівна, Воронів Віталій В'ячеславович, Ковальчук Павло В'ячеславович, Ларіонов Арсеній В'ячеславович	Продукт призначений для паяння різномірних з'єднань молібдену з неіржавіючою сталлю
122933	27.02.2039	СПОСІБ УСУНЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ	Лобанов Леонід Михайлович, Кондратенко Ігор Петрович, Пашин Микола Олександрович, Волков Сергій Симонівич	Спосіб призначений для технологічного забезпечення поточного виробництва відповідальних зварних конструкцій (елементи жорсткості, стрінгерні панелі, вертикальні кільцеві шви тощо)
123711	10.03.2039	СПОСІБ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛЕВОГО ЗРАЗКА	Савицький Михайло Михайлович, Губатюк Руслан Сергійович, Римар Сергій Володимирович, Савицький Олександр Михайлович, Прокоф'єв Олексій Сергійович, Костін Валерій Анатолієвич	Спосіб призначений для попереднього визначення параметрів процесу височастотної індукційної термічної обробки шляхом проведення її на спеціальних зразках

123798	04.04.2039	СПОСІБ ЛОКАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІНТЕРМЕТАЛІДУ СИСТЕМИ ТИТАН-АЛЮМІНІЙ	Лобанов Леонід Михайлович, Асніс Юхим Аркадійович, Вржижевський Едуард Леонович, Піскун Наталія Василівна, Статкевич Ігор Іванович	Спосіб призначений для термічної обробки зварних з'єднань легованих титанових сплавів, зокрема, до інтерметалідів системи титан-алюміній, які використовуються у загальному машинобудуванні, авіаційній техніці, хімічному машинобудуванні для виготовлення відповідальних вузлів, механізмів та обладнання
123980	20.12.2039	СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ПІДСИЛЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕТВОРЮВАННОГО ОБ'ЄМУ	Лобанов Леонід Михайлович, Волков Сергій Симонович	Спосіб призначений для тиражування оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки з метою їх використання в задачах аерокосмічного транспортування і забезпечення позаземної присутності
124126	11.11.2039	БАКТЕРИЦИДНИЙ СРІБЛОНАПОВНЕНИЙ ПОЛІМЕРНИЙ НАНОКОМПОЗИТ	Демченко Валерій Леонідович, Юрженко Максим Володимирович, Кобилінський Сергій Миколайович, Гончаренко Людмила Андріївна	Продукт призначений для підтримання безпечного середовища і здоров'я людини. Може застосовуватись при виготовленні покриттів для медичного обладнання, опакowania харчових продуктів, медичних виробів і окремих груп товарів, для виробництва платирів, присипок та інших засобів обробки раневої поверхні тощо
124127	11.11.2039	БІОДЕГРАДАБЕЛЬНИЙ МЕТАЛОНАПОВНЕНИЙ ПОЛІМЕРНИЙ НАНОКОМПОЗИТ З АНТИБАКТЕРІАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	Демченко Валерій Леонідович, Юрженко Максим Володимирович, Кобилінський Сергій Миколайович, Гончаренко Людмила Андріївна, Масючок Ольга Павлівна	Продукт призначений для підтримання безпечного середовища і здоров'я людини. Може застосовуватись при виготовленні покриттів для медичного обладнання, опакowania харчових продуктів, медичних виробів і окремих груп товарів, для виробництва платирів, присипок та інших засобів обробки раневої поверхні тощо
124172	20.12.2039	СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ГЕРМЕТИЧНИХ СЕКЦІОНОВАНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЕРТАННЯ	Лобанов Леонід Михайлович, Волков Сергій Симонович	Спосіб призначений для тиражування оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки для їх тиражованого використання в задачах аерокосмічного транспортування і забезпечення позаземної присутності
125981	24.06.2040	ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ	Коротинський Олександр Євтіхіївч; Жерносков Анатолій Максимович; Скопюк Михайло Іванович	Спосіб призначений для зварювання плавким електродом виробів з алюмінія та його високоміцних сплавів при виготовленні металоконструкцій у різних галузях техніки
126483	17.02.2040	СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ЗЛИВКІВ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ, ЛЕГОВАНИХ КИСНЕМ	Ахонін Сергій Володимирович; Пікулін Олександр Миколайович; Березос Володимир Олександрович; Северин Андрій Юрійович	Спосіб призначений для одержання високоякісних зливків титанових сплавів, які є хімічно однорідними по довжині та по перерізу, з високим ступенем легування киснем

НОВА КНИГА

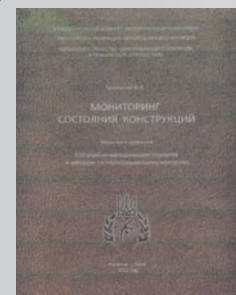
**Моніторинг стану конструкцій**

(навчальний посібник, введення в професію)

Видавництво «Інтерсервіс», формат А4, 246 стор., 962 кольорових рисунків

Перша частина книги присвячена основам дефектоскопії, вона цікава починаючим фахівцям, а інші частини є навчальними плакатами та оригінальними статтями з провідних професійних журналів США, Великобританії, Німеччини та інших країн.

У книзі описано оригінальні рішення з магнітного, капілярного та інших методів неруйнівного контролю.

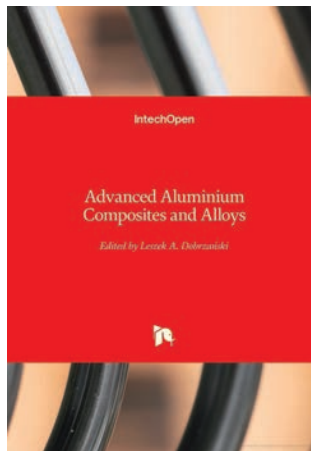
Замовлення книги: [ndt@paton.kiev.ua](mailto:ndt@paton.kiev.ua)

## NEW BOOKS

**Welding and Joining of Aerospace Materials**

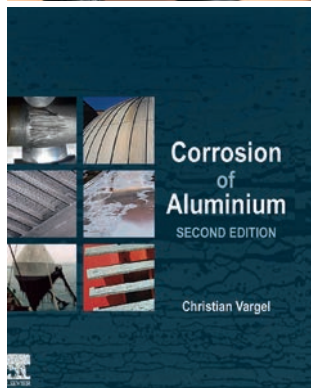
Editor: Mahesh Chaturvedi  
 eBook ISBN: 9780128191415  
 Paperback ISBN: 9780128191408

Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies  
 Welding and Joining of Aerospace Materials, Second Edition, is an essential reference for engineers and designers in the aerospace, materials, welding and joining industries, as well as companies and other organizations operating in these sectors. This updated edition brings together an international team of experts with updated and new chapters on electron beam welding, friction stir welding, weld-bead cracking, and recent developments in arc welding.

**Advanced Aluminium Composites and Alloys**

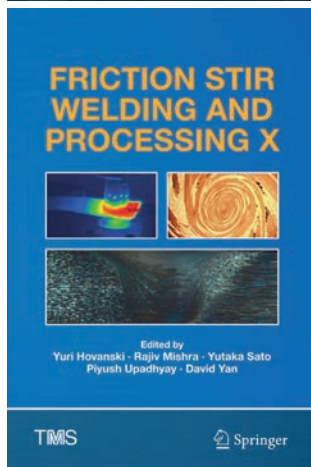
Leszek A. Dobrzański  
 DOI 10.5772/intechopen.87723  
 ISBN 978-1-83880-451-0  
 PRINT ISBN 978-1-83880-450-3  
 EBOOK (PDF) ISBN 978-1-83880-456-5

Aluminium is an engineering material of strategic importance in the current stage of Industry 4.0. This book discusses advanced composites based on aluminium alloys. It also describes pressure infiltration of gas with liquid aluminium, the mechanical synthesis of aluminium alloy powder and halloysite nanotubes (HNTs) or multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) consolidated by plastic deformation, selected optimization and prediction models, casting aluminium alloys containing zirconium, aluminium alloys subjected to high-speed extrusion of shapes, corrosion resistance of alloys containing lithium, machining conditions of alloys with copper and zinc additions, and more.

**Corrosion of Aluminium**

Christian Vargel  
 Hardcover ISBN: 9780080999258  
 eBook ISBN: 9780080999272

Corrosion of Aluminium, Second Edition, highlights the practical and general aspects of the corrosion of aluminium alloys. Chapters help readers new to the topic understand the metallurgical, chemical and physical features of aluminium alloys. Author Christian Vargel adopts a practitioner styled approach that is based on the expertise he has gained during a 40-year career in aluminium corrosion. The book assesses the corrosion resistance of aluminium, a key metric recognized as one of the main conditions for the development of many uses of aluminium in transport, construction, power transmission, and more.

**Friction Stir Welding and Processing X**

Yuri Hovanski, Rajiv Mishra, Yutaka Sato  
 ISSN 2367-1181 ISSN 2367-1696 (electronic) The Minerals, Metals & Materials Series ISBN 978-3-030-05751-0 ISBN 978-3-030-05752-7 (eBook)

A current look at friction stir welding technology from application to characterization and from modeling to R&D. Assembles recent progress relating to friction stir technologies including derivative technologies, high-temperature applications, industrial applications, dissimilar alloy/materials, lightweight alloys, simulation, and characterization. Led by industrial and academic experts in the field



## ПАМ'ЯТІ А.Г. ПОТАП'ЄВСЬКОГО



Дирекція та колектив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України з великим сумом сповіщають, що 2 січня 2023 р. на 97 році життя не стало старійшини зварювального виробництва України Аркадія Григоровича Потап'євського – доктора технічних наук, професора, лауреата

Ленінської премії, визначного вченого в галузі обладнання та технології зварювання в захисних газах та під флюсом, підтвердження відповідності продукції зварювального виробництва. Аркадій Григорович був останнім зі співробітників інституту, які працювали ще з засновником ІЕЗ академіком Є.О. Патonom.

Аркадій Григорович народився 1 грудня 1926 р. у м. Києві, де з золотою медаллю закінчив середню школу, а у 1946 р. – з відзнакою Київський річний технікум.

Юнацькі роки Аркадія Григоровича припали на тяжкий період Другої світової війни. У складі студентів технікуму він брав безпосередню участь в оборонних роботах із захисту рідного міста від загарбників, у будівництві мосту через р. Дніпро. Спорудження мосту восени 1943 р. виконувалося у тяжких умовах, при низьких температурах, під шквалом ворожого вогню. Замість запланованого місяця будівництво мосту було завершено протягом декількох тижнів, і в цьому була частка подвигу того юного хлопчика, а згодом шанованого професора Аркадія Григоровича. Під час війни Аркадій Григорович працює будівельником, слюсарем, матросом і рульовим на судах Дніпровської флотилії, не цураючись будь-якої найважчої роботи та докладаючи всіх можливих зусиль для звільнення Києва від загарбників.

У 1946 р. Аркадій Григорович вступає до Київського політехнічного інституту, який закінчує в 1952 р. за спеціальністю «Обладнання і технологія зварювального виробництва», як завжди, з відзнакою.

Свою трудову діяльність як науковця він почав студентом на кафедрі КПП і продовжив в ІЕЗ у відділі нових способів зварювання, де обіймав посади від інженера, наукового працівника до завідуючого лабораторією. Тут молодий вчений став автором і співавтором багатьох новаторських розробок: було розроблено схему управління проваром шва двома електродами під флюсом, технологію зварювання і наплавлення двошарових сталей;

оформлено технічні вимоги на дводугові автомати. Ці розробки знайшли впровадження на багатьох промислових підприємствах.

Разом з видатними вченими Д.А. Дудко і І.І. Зарубою він продовжує плідно працювати в галузі розробки технології зварювання в  $\text{CO}_2$ , бере участь у розробці і організації серійного виготовлення напівавтоматів А-547, випрямлячів типу ВС і систем централізованого забезпечення заводів вуглекислим газом. У 1960 р. Аркадій Григорович захищає кандидатську дисертацію.

У 1963 р. А.Г. Потап'євський і Д.А. Дудко у складі групи розробників технології зварювання в  $\text{CO}_2$  стали лауреатами Ленінської премії. Результати досліджень зі зварювання в  $\text{CO}_2$ , було опубліковано в чотирьох монографіях у 1959, 1960, 1966 рр.

Разом з Б.Є. Патonom Аркадій Григорович розробляє технології імпульсно-дугового зварювання в аргоні і в суміші газів та імпульсного зварювання кольорових металів і легованих сталей. Ці розробки захищено патентами ФРН, Франції, Великобританії, США і Японії. У співавторстві з М.В. Подолою і В.К. Лебедевим він розробляє джерела струму для імпульсно-дугового зварювання. Розробки оформлено патентами і відзначено срібними та бронзовими медалями ВДНГ.

У період 1965-1985 рр. Аркадій Григорович плідно займається як науковою, так і викладацькою діяльністю на кафедрі технології зварювання КПП, курсах підвищення кваліфікації інженерів-зварників. У 1974 р. він опубліковує монографію зі зварювання сталей і кольорових металів в захисних газах.

У 1975 р. Аркадій Григорович захищає докторську дисертацію «Дослідження і розробка імпульсно-дугового зварювання плавким електроодом в захисних газах», а у 1983 р. отримує звання професора.

У період 1989-1995 рр. Аркадій Григорович виконує наукові роботи з дослідження залежності процесів зварювання в захисних газах від швидкості нарощування струму короткого замикання в зварювальному ланцюгу. На підставі досліджень розроблено програми управління переносом металу через дугу і технічні вимоги до джерел живлення для зварювання в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}$  і в суміші газів плавким електроодом, ряд принципів програм і схем управління випрямлячів з комбінованими зовнішніми характеристиками і регульованими динамічними властивостями. Він організовує серійне виробництво напівавтоматів і випрямлячів.

Сміливість і сила особистості Аркадія Григоровича проявилась і тоді, коли він, будучи визнаним вченим, у 1990-ті роки розпочинає новий напрямок діяльності – підтвердження відповідності зварювальної продукції. У цьому зв'язку постала необхідність мати не тільки технічні, а й юридичні знання щодо законодавчого регулювання, метрології, міжнародних актів, які стосуються торгівлі і переміщення товарів через кордон. Тому Аркадій Григорович підвищує кваліфікацію на курсах Держспоживстандарту, Міністерства економічного розвитку і торгівлі, Укрметр-тестстандарту, знову «сідаючи за парту». Аркадій Григорович здає державний екзамен і отримує кваліфікацію аудитора з сертифікації зварювального обладнання і технології зварювання. Він визначає систему показників для оцінки безпеки та якості зварювального обладнання і технологічних процесів, методики випробування і процедури сертифікації.

За результатами його рекомендацій підвищили якість і безпеку продукції всі виробники зварювального обладнання України. Було доопрацьовано технології зварювання відповідальних зварних конструкцій провідними підприємствами, що

здійснюють виготовлення і ремонт котлів, посудин тиску, кранів, теплових мереж.

Маючи вже поважний вік, Аркадій Григорович, співпрацюючи з підприємствами в галузі підтвердження відповідності зварювальної продукції, займається вивченням і аналізом нових міжнародних вимог до зварювального виробництва: Європейських директив, Технічних регламентів, стандартів ISO та EN. На підставі даних він готує статті, доповіді на національних і міжнародних конференціях, співпрацює з виробниками з метою впровадження кращих показників якості на вітчизняних підприємствах.

Аркадій Григорович працював майже до кінця життя. Він був людиною глибоко закоханою в свою справу. Його надихало виробництво як творіння рук людських; нові цікаві конструктивні рішення і технології. Аркадій Григорович щиро любив природу, рідне місто, сім'ю, був доброю, чуйною людиною, цікавою до всього нового. Велика шана і подяка будуть жити в учнях Аркадія Григоровича, а його книги ще довго навчатимуть наступні покоління улюбленій зварювальній справі, якій Аркадій Григорович присвятив своє яскраве насичене життя.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
Редколегія журналу

## ПЕРЕДПЛАТА 2023



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



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



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

### РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

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

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

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

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

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

### ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

### ВИДАВНИЦТВО

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