

## ЗМІСТ

НВО «Червона Хвиля» — 25! ..... 3

### ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

*Ахонін С.В., Єрохін О.Г.* Математичне моделювання процесу розчинення частинок діоксиду титану в розплаві титану ..... 5

*Яковчук К.Ю., Мьяльниця Г.П., Микитчик А.В., Рудой Ю.Е., Ткач Р.О.* Удосконалення термобар'єрного покриття типу  $\text{CoCrAlY/ZrO}_2-8\% \text{ Y}_2\text{O}_3$  шляхом легування алюмінієм поверхні металевого шару ..... 11

### ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

*Кусков Ю.М., Проскурдін В.М., Лентюгов І.П., Жданов В.О., Окопнік Л.Л.* Досвід вивчення ефекту обертання шлакової ванни при електрошлаковому наплавленні дискретною присадкою ..... 18

*Педченко С.О., Костецький Ю.В., Петренко В.Л., Медовар Л.Б.* Рециклінг відпрацьованого некомпактного інструменту зі швидкоріжучої сталі способом електрошлакового переплаву ..... 23

### ПЛАЗМОВО-ДУГОВА ТЕХНОЛОГІЯ

*Строгонов Д.В., Коржик В.М., Цзянлун І, Тунік А.Ю., Бурлаченко О.М., Альошин А.О.* Вплив параметрів процесу плазмово-дугової сферодизації струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі на гранулометричний склад отриманих порошків ..... 29

### ВАКУУМНО-ДУГОВИЙ ПЕРЕПЛАВ

*Капустян О.Є., Акрітова Т.О.* Дослідження якості зливків цирконієвого сплаву системи  $\text{Zr-Nb-Ti}$ , виплавлених способом вакуумно-дугового переплаву з витратним електродом ..... 38

### МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

*Устінов А.І., Мельниченко Т.В., Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В.* Вплив багат шарових прошарків  $\text{Al-Si}$  та  $\text{Al-Cu}$  на формування структури з'єднання композиту  $\text{SiC}_p\text{-AMg5}$  при дифузійному зварюванні ..... 44

*Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В., Петриченко І.К., Радченко Л.М., Руханський С.Б.* Вплив присадного матеріалу на структуру та властивості зварних з'єднань високоміцного титанового сплаву VT19 ..... 53

### ІНФОРМАЦІЯ

Інноваційний апарат для очистки поверхні та друку зображень: MagicCleaner ..... 63

#### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, м. Київ:

**С.В. Ахонін** (головний редактор),

**В.О. Березос, В.А. Костін, І.В. Кривцун, Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко, А.І. Устінов, В.О. Шаповалов;**
**М.М. Гасик**, Аалто Університет, Еспоо, Фінляндія,

**М.І. Гречанюк**, Інститут проблем матеріалознавства НАНУ, м. Київ,

**М. Зініград**, Аріельський університет, Центр матеріалознавства, Ізраїль,

**О.М. Івасішин**, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, м. Київ, **П.І. Лобода**, НТУУ

«КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ,

**О.В. Овчинников**, ЗНТУ, м. Запоріжжя,

**С.Я. Шипицин**, ФТІМС НАНУ, м. Київ

#### Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

#### Редакція

Д.М. Дяченко (відповід. секретар), Т.Ю. Снегірьова, А.І. Сулима

#### Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, 03150, Україна, Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 205 23 90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

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

Журнал входить до переліку затверджених Міністерством освіти і науки України видань для публікації праць здобувачів наукових ступенів за спеціальностями 132, 133

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 24212-14052 ПР від 03.12.2019

ISSN 2415-8445

 DOI: <https://doi.org/10.15407/sem>

#### Передплата 2023

Передплатний індекс 70693

4 випуски на рік (видається щоквартально)

Друкована версія: 1120 грн. за річний комплект з урахуванням доставки

рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 1120 грн. за річний комплект

**EDITORIAL BOARD**

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

**S.V. Akhonin** (Editor in Chief),

**V.O. Berezos, V.A. Kostin, I.V. Krivtsun,**
**L.B. Medovar, G.P. Stovpchenko, A.I. Ustinov,**
**V.O. Shapovalov;**
**M.M. Gasik**, Aalto University,

Espoo, Finland,

**M.I. Grechanyuk**, Institut for Problems of Material Science of NASU, Kyiv,

**M. Zinigrad**, Ariel University,

Materials Science Centre, Israel,

**O.M. Ivasishyn**, G.V. Kurdyumov Institute

for Metal Physics of NASU, Kyiv,

**P.I. Loboda**, NTUU «Igor Sykorsky

Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv,

**O.V. Ovchynnikov**, Zaporozhye National Technical University, Ukraine,

**S.Ya. Shpytyn**, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys, Kyiv

**Founders**

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

**Editors**

D.M. Diachenko (execut. secretary),

T.Yu. Snegiryeva, A.I. Syluma

**Address**

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,

03150, Ukraine, Kyiv,

11 Kasymyr Malevych Str.

Tel./Fax: (38044) 205 23 90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/sem>

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 132, 133 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 № 24212-14052PR dated 03.12.2019  
 ISSN 2415-8445

 DOI: <https://doi.org/10.15407/sem>
**Subscription 2023**

Subscription index 70693

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

 \$128, subscriptions for the printed (hard copy) version,  
 air postage and packaging included.

 \$96, subscriptions for the electronic version  
 (sending issues of Journal in pdf format  
 or providing access to IP addresses).

**CONTENTS**

NVO «Chervona Hvylya» is 25! ..... 3

**ELECTRON BEAM PROCESSES**
*Akhonin S.V., Yerokhin O.G.* Mathematical modeling of the process of dissolution of titanium dioxide particles in the titanium melt ..... 5

*Yakovchuk K.Yu., Myalnitsya G.P., Mykytchuk A.V., Rudoy Yu.E., Tkach R.O.* Development of the CoCrAlY/ZrO<sub>2</sub>-8 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> type thermal barrier coating by surface doping of the metal layer with aluminum ..... 11

**ELECTROSLAG TECHNOLOGY**
*Kuskov Yu.M., Proskudin V.M., Lentugov I.P., Zhdanov V.O., Okopnik L.L.* Experience of studying the effect of slag pool rotation at electroslag surfacing with a discrete filler ..... 18

*Pedchenko E.O., Kostetskyi Yu.V., Petrenko V.L., Medovar L.B.* Recycling of used noncompact tools from high-speed steel by electroslag remelting ..... 23

**PLASMA-ARC TECHNOLOGY**
*Strogonov D.V., Korzhyk V.M., Jianglong Yi, Tunik A.Yu., Burlachenko O.M., Alyoshyn A.O.* Influence of the parameters of the process of plasma-arc spheroidization of current-conducting wire from low-carbon steel on the granulometric composition of the produced powders ..... 29

**VACUUM-ARC REMELTING**
*Kapustyan O.Ye., Akrytova T.O.* Composition of zirconium alloy ingots of Zr-Nb-Ti system melted by integrated vacuum-arc technology ..... 38

**MATERIALS SCIENCE**
*Ustinov A.I., Melnychenko T.V., Falchenko Yu.V., Petrushinets L.V.* Influence of Al-Si and Al-Cu multilayer on the formation of the joint structure of SiC<sub>p</sub>-AMg5 composite during diffusion welding ..... 44

*Akhonin S.V., Bilous V.Yu., Selin R.V., Petrychenko I.K., Radchenko L.M., Rukhanskyi S.B.* Influence of filler material on the structure and properties of welded joints of high-strength VT19 titanium alloy ..... 53

**INFORMATION**

Innovative device for surface cleaning and image printing: MagicCleaner ..... 63

## НВО «Червона Хвиля» — 25!

В вересні святкує своє 25-річчя київське підприємство ПрАТ «НВО «Червона Хвиля».

Вся історія підприємства з моменту заснування у далекому 1997 р. нероздільно пов'язана з титановим виробництвом, а також з розвитком і впровадженням електронно-променевих технологій.

Початковою метою діяльності молоді компанії стало створення першого в Україні повного циклу з виробництва титанових зливків. На підприємстві було створено виробничу ділянку з якісної підготовки титанового брухту до переплаву. Спільно з Науково-виробничим центром «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона було розроблено методику виробництва високоякісних титанових зливків електронно-променевим переплавом з шихти, яка повністю складалася з брухту та відходів. В результаті вже через рік на світовому титановому ринку з'явилися дешеві та якісні зливки та сляби, які купували гранди титанової індустрії у США, Європі та Китаї. НВО «Червона Хвиля» швидко перетворилася з експортера сировини на імпортера титанового брухту та найбільшого в Україні експортера титанових напівфабрикатів.

З часом більшість компаній, у яких утворювалося багато титанових відходів, вирішили додати до свого традиційного парку плавильних систем електронно-променевої плавильні печі — в титановому світі розпочався справжній бум такого обладнання. Тому власники НВО «Червона Хвиля» вирішили переорієнтувати свою діяльність з металевого виробництва на створення найсучаснішого електронно-променевого плавильного обладнання — вони мали підстави вважати, що ніхто інший не мав такого поєднання знань особливостей технології плавки з власною реальною виробничою практикою.

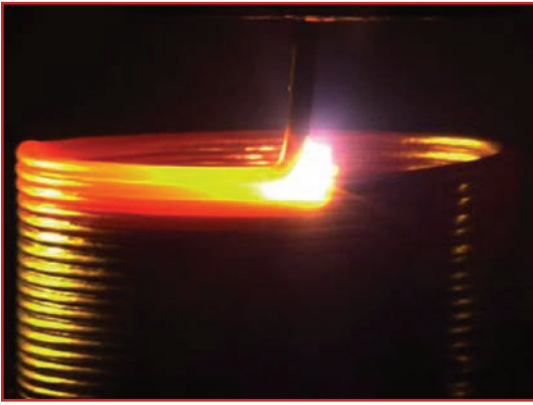
З цією метою в 2005 р. було створено Конструкторське бюро вакуумно-металургійного обладнання з командою висококласних конструкторів, інженерів та технологів. Вже через три роки було спроектовано і збудовано першу велику електронно-променеву плавильну піч для виробництва 10-тонних титанових зливків. Потім були інші проекти, пов'язані не тільки з титаном, але й іншими вартісними металами.

Слід відзначити, що основою всіх розробок компанії — технологічних і конструктивних — завжди були газорозрядні електронні гармати. Унікальне поєднання виняткових технологічних можливостей, широкого діапазону технічних умов експлуатації та простоти обслуговування зробили ці гармати незамінним інструментом для багатьох процесів вакуумної металургії. Розроблені інженерами компанії газорозрядні електронно-променевої гармати потужністю до 600 кВт використовуються в усьому світі для плавки та рафінування титану, ніобію, танталу, молібдену, ванадію, цирконію, кремнію та платини у сучасних системах EB-PVD та спеціальних зварювальних застосуваннях.



Виняткова здатність газорозрядних електронних гармат безпосередньо генерувати профільні електронні промені, у тому числі порожнисті, стала передумовою для створення в 2014 р. технології 3D друку, відомої як xBeam 3D Metal Printing. Ця розробка стала початком нового етапу розвитку компанії в галузі адитивного виробництва. Технічні характеристики спеціальної електронної гармати та особливості технологічного процесу осадження забезпечили значні конкурентні переваги цієї техно-





логії. Перші замовлення на системи 3D друку xBeam почали надходити ще на стадії розробки. До цього часу вже доведено незалежними дослідженнями можливість виготовлення 3D друком титанових виробів, які за властивостями не поступаються якості традиційного кованого металу, що є критичним для аерокосмічної галузі.

Наукові дослідження завжди займали особливе місце в діяльності НВО «Червона Хвиля» адже основний бізнес компанії — розробка високотехнологічного обладнання, що вимагає як фундаментального теоретичного обґрунтування технологічних та інженерних рішень, так і підтвердження отриманих результатів глибокими дослідженнями структури та властивостей металевих ви-

робів, отриманих за розробленими методиками. Поєднання великого досвіду інженерів компанії в проектуванні вакуумних систем з глибокими знаннями технологів у фізичній металургії дозволяє не тільки конкурувати з найкращими іноземними технологіями, але й часто перевершувати їх за рахунок неординарних технічних рішень. Інновації, розроблені колективом НВО «Червона Хвиля», захищені патентами та заявками на винаходи в Україні, США, Німеччині, Китаї тощо. Вчені та технологи компанії є постійними учасниками та доповідачами на міжнародних конференціях в галузях титанового виробництва, електронно-променевих та адитивних технологій.

Останнім часом основним напрямком науково-технічних досліджень та розробок НВО «Червона Хвиля» є вивчення технологічних можливостей профільних електронних променів, які можна згенерувати за допомогою газорозрядних електронних гармат з різною конфігурацією електродних систем.

Успішна науково-дослідницька діяльність НВО «Червона Хвиля» була б неможливою без мето-

дологічного та практичного співробітництва з партнерами з академічного та університетського середовища, серед яких можна відзначити Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», TWI та Університет Манчестера (Велика Британія), Шанхайський університет науки та технологій (Китай) та, звичайно, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, з яким тісно пов'язана вся історія розвитку компанії — від заснування до цього часу.



Сьогодні НВО «Червона Хвиля» продовжує розвивати та вдосконалювати технологічну та інженерну базу. Колектив компанії — це близько двадцяти науковців, серед яких один доктор та два кандидати наук, інженерів та конструкторів, на рахунок яких десятки реалізованих дослідницьких та промислових проектів.

На протязі всіх 25 років своєї історії компанія спирається на три основні принципи — власні технології, власний дизайн обладнання, власний досвід експлуатації. Це завжди допомогало ефективно долати весь шлях від розробки до

впровадження і отримувати визнання провідних компаній у всьому світі.

Ми віримо, що наші кращі розробки ще попереду!

Запрошуємо до співробітництва!

Директор НВО «Червона Хвиля»  
Дмитро Ковальчук



  
**CHERVONA HVILYA**  
<https://xbeam3d.com/>

## *Інноваційний апарат для очистки поверхні та друку зображень: MagicCleaner*

Останнє покоління MagicCleaner від компанії Fronius тепер доступне у двох моделях. Пристрої серії MagicCleaner — це інноваційні засоби обробки зварних швів, які виконано методом зварювання TIG, і поверхні деталей із нержавіючої сталі. На додаток до чудово відполірованих зварювальних швів TIG, цей надійний апарат також може маркувати деталі логотипами або серійними номерами. Повна гнучкість, щоб розкрити свій зварювальний потенціал!

Нержавіюча сталь вирізняється, зокрема, наявністю хімічно пасивного шару зварного шва, який захищає метал від впливу навколишнього середовища. Під час зварювання він може зруйнуватися. У такому разі поверхня металу біля шва набуде забарвлення мінливого кольору та стане вразливою для корозії. Належні вигляд і стійкість матеріалу в довгостроковій перспективі можна буде відновити лише за допомогою професійної електрохімічної обробки — очищення та пасивування поверхні. Саме для таких потреб компанія Fronius створила серію пристроїв MagicCleaner. Завдяки новітній концепції та продуманій конструкції вони чинять мінімальний вплив на поверхню матеріалу порівняно із засобами хімічного та механічного очищення, а обробка здійснюється швидко та не передбачає додаткового пасивування.

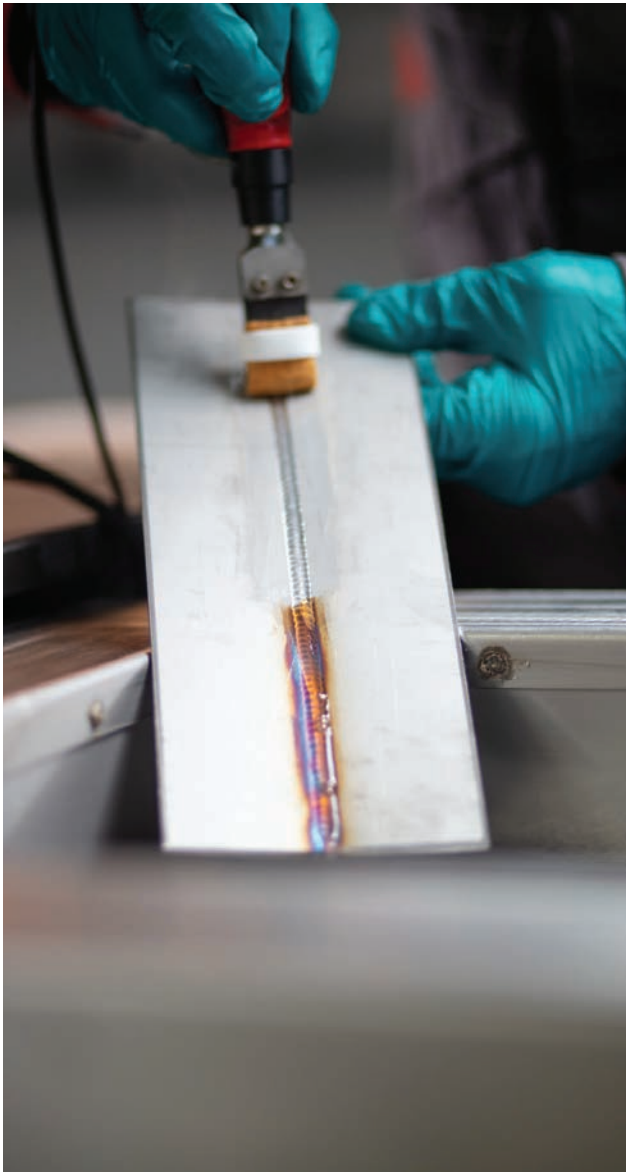
За допомогою MagicCleaner легко відновити захисний шар на зварних швах і поверхнях з нержавіючої сталі. Незалежно від конфігурації пристрою — з ємністю 1,8 л (MagicCleaner 300) або тубиком, який встановлено на очищувальному пальнику, — користувачі можуть точно та зручно

регулювати споживання електроліту. Це сприяє економії ресурсів і дає змогу досягти екологічності виробництва. За допомогою MagicCleaner розчин електроліту доставляється саме туди, куди потрібно. Фетр для очистки та полірування, щітки, що входять у комплект, проникають у кути та щілини, забезпечуючи оптимальне очищення з мінімальним використанням матеріалів. Електрохімічне очищення значно економніше, ніж звичайне травлення в хімічних ваннах, і не руйнує матеріал, як піскоструменева обробка. Розробники подбали, аби користувачі могли легко та швидко ввести обладнання в експлуатацію, й реалізували інтуїтивно зрозумілу концепцію керування. Завдяки цьому усі важливі параметри (режим роботи, характеристики очищення та показники споживання електроліту) можна переглянути та налаштувати на передній панелі пристрою. Пристрої вирізняються легкістю й енергоефективністю, оскільки втілили в собі новітню інверторну технологію. Ця технологія забезпечує вихідну потужність на рівні пристроїв попереднього покоління за меншого споживання електроенергії.



MagicCleaner 150 — легка підготовка до роботи та простота використання





Порівняння до і після: зварювальний шов TIG швидко та легко очищається електрохімічно. Фетр для очистки та полірування автоматично змочується електролітом

MagicCleaner — найсучасніша система електрохімічного очищення. Крім власне очищення, вона дає змогу полірувати поверхні деталей із нержавіючої сталі та наносити на них різноманітні зображення. Очищення та пасивування поверхні деталей із нержавіючої сталі здійснюється протягом одного проходу. Іншими словами, видалення забарвлення мінливого кольору, що виникає під час зварювання, та відновлення захисного хімічно пасивного шару зварного шва відбувається одно-



Чорний або білий друк для постійного маркування деталей з нержавіючої сталі позбавляє від необхідності тиснення, гравіювання або склеювання



MagicCleaner доступний у двох розмірах: MagicCleaner 150 для гнучкого та портативного використання та MagicCleaner 300 для більш інтенсивного використання на довгих зварних швах або великих площах очистки

часно. Полірування, яке виконують після очищення, надає поверхні деталей із нержавіючої сталі стійкого блиску та забезпечує якісніше пасивування. Крім того, за допомогою пристроїв лінійки MagicCleaner на поверхню деталей із нержавіючої сталі можна наносити різноманітні зображення чорним або білим друком. Ця чудова функція дає змогу відмовитися від наклейок і лазерного гравіювання. Все, що потрібно, це відповідна плівка та спеціальний розчин електроліту.

*Fronius International — австрійська компанія з головним офісом в місті Петтенбах і відділеннями в містах Вельс, Тальхайм, Штайнхаус і Заттледт. Компанія, штат якої налічує 5660 співробітників по всьому світу, працює в галузях зварювального обладнання, фотовольтаїки та систем для заряджання акумуляторних батарей. Близько 92 % продукції компанії постачається на експорт за допомогою 36 міжнародних дочірніх компаній Fronius, а також мережі торгових партнерів і представників у більш ніж 60 країнах. Компанія Fronius пропонує інноваційні продукти та послуги, а також володіє 1321 чинними патентами, що робить її світовим лідером інновацій.*