

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

**С.В. Ахонін** (головний редактор),

**В.О. Березос, Ф.К. Біктагіров, Ю.В. Костецький,**

**В.А. Костін, І.В. Кривцун, С.В. Римар,**

**А.І. Устїнов, В.О. Шаповалов;**

**М.М. Гасик**, Аалто Університет, Еспоо, Фінляндія;

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

**О.М. Івасішин**, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, м. Київ;

**Ю.Г. Квасницька**, ФТІМС НАНУ, м. Київ;

**П.І. Лобода,**

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ;

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

**С.В. Петров**, Інститут газу НАНУ, м. Київ.

**Виконавчий редактор** — О.Т. Зельніченко,  
Міжнародна Асоціація «Зварювання», м. Київ

## Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

## Редакція

Д.М. Дяченко (відповід. секретар),

Л.М. Герасименко, Т.Ю. Снегір'ова, А.А. Чайка

## Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ,

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Тел.: (38044) 205 23 90

E-mail: [patonpublishinghouse@gmail.com](mailto:patonpublishinghouse@gmail.com);

[journal@paton.kiev.ua](mailto: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, 136.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу.

Журнал зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення 11.09.2025, ідентифікатор друкованого медіа R30-06490, ідентифікатор он-лайн медіа R40-06487; реєстрант — ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

ISSN 3041-2382 print

ISSN 3041-2331 online

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

## Передплата 2026

Передплатний індекс 70693

4 випуски на рік (видається щоквартально)

Друкована версія: 1680 грн. за річний комплект з урахуванням доставки

рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 1680 грн. за річний комплект.

## ЗМІСТ\*

Журналу «Сучасна електрометалургія» — 40 років ..... 3

## ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

*Ахонін С.В., Березос В.О., Єрохін О.Г., Северин А.Ю., Мітіна Т.О., Крижановський В.А.* Структура і механічні властивості деформованих напівфабрикатів зі сплаву ВТ8, отриманого способом електронно-променевої плавки ..... 4

*Осокін В.О., Дідікін Г.Г., Горностай О.В., Грабін В.В., Борецький В.В.* Особливості впливу відпалу композиційних матеріалів NaCl-Fe, отриманих способом EB-PVD ..... 10

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

*Костецький Ю.В., Петренко В.П., Педченко Є.О., Полішко Г.О., Зайцев В.А.* Рециклінг нікелевих сплавів способом електрошлакового переплаву ..... 17

*Костецький Ю.В., Педченко Є.О., Петренко В.П., Полішко Г.О., Зайцев В.А., Трикозенко Д.І.* Дослідження поведінки легувальних елементів під час електрошлакового переплаву високохромистої борвмісної сталі ..... 26

## ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТАЛУРГІЇ

*Шаповалов В.О., Жиров Д.М., Біктагіров Ф.К., Гнатушенко О.В., Барабаш В.В., Ігнат'ов А.П.* Огляд процесів одержання заліза шляхом електролізу ..... 31

*Біктагіров Ф.К., Злигорев К.В.* Ліквіація в сталевому зливку та можливості її зниження ..... 37

## ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ ТА ФЕРОСПЛАВІВ

*Богаченко О.Г., Міщенко Д.Д., Гончаров І.О., Нейло І.О., Кійко С.Г., Логозинський І.М., Горбань К.М., Федьков О.Г.* Дослідження процесів дифузії та їх впливу на питомий електричний опір графітованих гнотових електродів, застосовуваних в промислових дугових сталеплавильних печах ..... 43

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

*Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В.* Структура і властивості зварних з'єднань титанового сплаву ПТ-ЗВ, отриманих зварюванням у вузький зазор ..... 49

## ІНФОРМАЦІЯ

В.О. Шаповалову — 75! ..... 57

Розвиток в ІЕЗ ім. Є.О. Патона електронно-променевих технологій для створення нових матеріалів та функціональних покриттів ..... 58

Тринадцята конференція студентів, аспірантів, молодих учених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» ..... 62

\*Статті з журналу «Сучасна електрометалургія» вибірково перевидуються англійською мовою в журналі «The Paton Welding Journal»:

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

**EDITORIAL BOARD**

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

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

**V.O. Berezos, F.K. Biktairov, Yu. V. Kostetskiy,**

**V.A. Kostin, I.V. Krivtsun, S.V. Rymar,**

**A.I. Ustinov, V.O. Shapovalov;**

**M.M. Gasik**, Aalto University, Espoo, Finland;

**M.I. Grechanyuk**, Institute for Problems of Material

Science of NASU, Kyiv;

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

for Metal Physics of NASU, Kyiv;

**Yu.H. Kvasnytska**, Physico-Technological

Institute of Metals and Alloys, Kyiv;

**P.I. Loboda**, NTUU «Igor Sykorsky

Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;

**O.V. Ovchynnikov**, Zaporizhzhia National Technical

University, Ukraine;

**S.V. Petrov**, The Gas Institute of NASU, Kyiv.

**Executive Editor** — O.T. Zelnichenko,  
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine.

**Publisher**

International Association «Welding»

**Editors**

D.M. Diachenko (execut. secretary),

L.M. Gerasymenko, T.Yu. Snegiryeva, A.A. Chaika

**Address of Editorial Office**

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 205 23 90

E-mail: patonpublishinghouse@gmail.com;

journal@paton.kiev.ua

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

The Journal is included into 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, 136.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing by the Editorial Board

of the Journal.

The Journal was registered by

the National Council of Ukraine

on Television and Radio Broadcasting on 11.09.2025,

carrier identifier of print media R30-06490,

carrier identifier of on-line media R40-06487;

registrant — E.O. Paton Electric Welding Institute

of NAS of Ukraine.

ISSN 3041-2382 print

ISSN 3041-2331 online

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

**Subscription 2026**

Subscription index 70693

4 issues per year (issued monthly),

back issues available.

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

96 Euros, subscriptions for the electronic version

(sending issues of Journal in pdf format  
or providing access to IP addresses).

**CONTENTS\***

Special Electrometallurgy Journal is 40 ..... 3

**ELECTRON BEAM PROCESSES**

*Akhonin S.V., Berezos V.O., Yerokhin O.G., Severin A.Yu., Mitina T.O., Kryzhanovskiy V.A.* Structure and mechanical properties of deformed semifinished products made from VT8 alloy produced by electron beam melting ..... 4

*Osokin V.O., Didikin G.G., Gornostai O.V., Grabin V.V., Boretsky V.V.* Features of the influence of annealing of NaCl–Fe composite materials produced by EB-PVD ..... 10

**ELECTROSLAG TECHNOLOGY**

*Kostetskiy Yu.V., Petrenko V.P., Pedchenko E.O., Polishko G.O., Zaitsev V.A.* Recycling of nickel alloys by electroslag remelting ..... 17

*Kostetskiy Yu.V., Pedchenko E.O., Petrenko V.P., Polishko G.O., Zaitsev V.A., Trykozenko D.I.* Investigation of the behavior of alloying elements during electroslag remelting of high-chromium boron-containing steel ..... 26

**GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY**

*Shapovalov V.O., Zhyrov D.M., Biktairov F.K., Hnatushenko O.V., Barabash V.V., Ignatov A.P.* Overview of the processes of producing iron by electrolysis ..... 31

*Biktairov F.K., Zlygoriev K.B.* Segregation in a steel ingot and possibilities for its lowering ..... 37

**ELECTROMETALLURGY OF STEEL AND FERROALLOYS**

*Bogachenko O.G., Mishchenko D.D., Goncharov I.O., Neilo I.O., Kiiiko S.G., Logozynskiy I.M., Gorban K.M., Fedkov A.G.* Investigation of the processes of diffusion and their influence on electrical resistivity of graphitized wick electrodes applied in industrial steelmaking arc furnaces ..... 43

**MATERIALS SCIENCE**

*Akhonin S.V., Bilous V.Yu., Selin R.V.* Structure and properties of welded joints of titanium alloy PT-3V produced by narrow-gap welding ..... 49

**INFORMATION**

V.O. Shapovalov is 75! ..... 57

Development of electron beam technologies for creation of new materials and functional coatings at PWI ..... 58

13<sup>th</sup> Conference of Students, Post-Graduates, Young Scientists and Specialists on «Superhard Composite Materials and Coatings: Production, Properties and Application» ..... 62

\*Articles from «Suchasna Elektrometalurhiya» (Electrometallurgy Today) journal are selectively translated into English and included into the contents of «The Paton Welding Journal»: <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj>

## **ЖУРНАЛУ «СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ» — 40 РОКІВ**

Виповнилося 40 років з дня виходу в світ першого номера журналу «Сучасна електрометалургія». За минулі роки вийшло 160 випусків журналу, в якому було опубліковано понад 2560 науково-технічних статей, оглядів, інформаційних та рекламних матеріалів.

Журнал мав двох попередників. У 1968 р. з'явився збірник «Спеціальна електрометалургія», який був необхідний для висвітлення новітніх досягнень Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в галузі розробки та вдосконалення способів отримання нових металевих матеріалів. Збірник видавався протягом 25 років (70 випусків), але був доступний вузькому колу фахівців.

З 1975 р. Інститут почав видавати республіканський міжвідомчий збірник наукових праць «Проблеми спеціальної електрометалургії» (21 випуск за період 1975–1984 рр.), згодом перетворений на міжнародний науково-теоретичний та виробничий журнал під тією ж назвою (1985–2002 рр.).

З метою більш широкого висвітлення досягнень у галузі металургійних процесів і розширення тематики журналу редакційна колегія прийняла рішення з 2003 р. видавати журнал «Проблеми спеціальної електрометалургії» під назвою «Сучасна електрометалургія» і ввести нові розділи. Це дозволило зробити кожен випуск тематично більш різноманітним, значно підняти рівень журналу, зробити його цікавим і справді міжнародним виданням.

Популярність журналу була досить високою, про що свідчить його видання англійською мовою видавництвом «Cambridge International Science Publishing» (Великобританія) під назвою «Advances in Special Electrometallurgy» (1985–2001 рр.), «Advances in Electrometallurgy» (2002–2014 рр.)

Незмінним головним редактором журналу «Сучасна електрометалургія» був його засновник академік Борис Євгенович Патон, який 12 грудня 2019 р. призначив головним редактором журналу академіка Сергія Володимировича Ахоніна. Заступниками головного редактора журналу у різні роки були відомі українськи вчені академіки Б.І. Медовар та Г.М. Григоренко.

Протягом усіх років випуску журналу в центрі уваги завжди було висвітлення наукових і виробничих досягнень у галузі спеціальної електрометалургії сталі, сплавів різного призначення та кольорових металів, розробки і новацій, пов'язаних із застосуванням і розвитком електрошлакового, електронно-променевого і плазмово-дугового переплавів.

З року в рік редколегія розширяє коло висвітлюваних питань і проблем шляхом публікації матеріалів, що стосуються появи нових перспективних процесів і технологій електрометалургії, нових металевих матеріалів та їх службових характеристик. Зросла кількість публікацій статей дослідницького характеру, що обумовлено появою самостійного класу металевих матеріалів, які отримують шляхом випаровування металів у вакуумі з подальшою конденсацією, а також можливістю впливати на якісні характеристики металів і сплавів на раніше недоступному досить тонкому рівні (наноматеріали).

Традиційні напрямки в спеціальній електрометалургії, її процеси, технології, отримані матеріали та їх застосування були і залишаються пріоритетними для редколегії та редакції журналу.

Редколегія журналу дякує читачів і авторів за підтримку та має надію, що журнал буде корисним всім, хто працює в електрометалургії як в Україні, так і за її межами.

## В.О. ШАПОВАЛОВУ — 75!



У листопаді 2025 р. виповнилося 75 років відомому вченому у галузі спеціальної електрометалургії та матеріалознавства доктору технічних наук, професору, члену-кореспонденту НАН України, Лауреату державної премії України у галузі науки і техніки (2013), Лауреату премії ім. Є.О. Патона (2017), Лауреату премії Кабінету Міністрів України (2019), Заслуженому діячу науки і техніки України (2021), Лауреату премії ім. М.М. Доброхотова (2025) Віктору Олександровичу Шаповалову.

Віктор Олександрович закінчив у 1972 р. Ворошилоградський машинобудівний інститут, в якому працював у науково-дослідному центрі. У 1978 р. вступив до аспірантури при ІЕЗ ім. Є.О. Патона, після закінчення якої працює в інституті, де пройшовши всі сходи наукового зростання — від молодшого наукового співробітника до завідувача відділу «Плазмово-шлакової металургії» та заступника директора Інституту. У 1984 р. Шаповалов В.О. успішно захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата, у 2003 р. — доктора технічних наук у галузі металургії, у 2012 р. йому присвоєне звання професора, а в 2018 р. він був обраний членом-кореспондентом Національної академії наук України.

Професійна діяльність Віктора Шаповалова тісно пов'язана з новими металургійними технологіями на основі 3D друку плазмових та електрошлакових процесів. Одним з істотних його наукових досягнень є створення та удосконалення нового та унікального плазмово-індукційного способу вирощування супервеликих монокристалів тугоплавких металів (вольфрам та молібдену). Розроблені ним теоретичні і практичні засади, а також створене обладнання, аналогів якого немає в світі, дозволяє вирощувати профільовані монокристали тугоплавких металів надвеликих розмірів, що безперечно є визначним досягненням української науки. Під його керівництвом роботи в цьому важливому напрямку продовжуються: створюється обладнання, проводяться дослідження та експерименти по вирощуванню монокристалів тугоплавких металів круглого перетину діаметром до 80 мм, які неможливо отримати іншими відомими технологіями.

Наукові та організаторські здібності В.О. Шаповалова яскраво проявилися при вирішенні проблеми виробництва в Україні кремнію для сонячних панелей. У 2008–2009 рр. йому вдалося об'єднати колективи установ НАН України, вузів та промисловості, що дозволило розробити і реалізувати Цільову державну науково-технічну програму «Створення хіміко-металургійної галузі виробництва чистого кремнію протягом 2009-2012 рр.». Постановою Кабінету Міністрів України у 2008 р. Шаповалова В.О. було призначено керівником програми, де він курирував наукові напрямки щодо дослідження складу та процесів збагачення кварцової сировини, відновлення кремнію із силанів у плазмі, розроблення методик дослідження отриманих матеріалів та створення нормативно-технічної бази нової галузі. Виконані роботи та отримані досягнення були високо оцінені, колектив співробітників з його участю отримали у нагороду Державну премію України. За значний внесок у розвиток вітчизняної науки у 2018 р. Віктора Олександровича нагороджено Почесною грамотою Верховної Ради України. На зараз він є керівником, спільно з Національним фондом досліджень України, проєкту програми «Наука для зміцнення обороноздатності України» 2024–2025 рр.

Останнім часом Віктор Олександрович особливу увагу приділяє вирішенню актуальної проблеми щодо розробці теоретичних засад та новітніх промислових технологій підвищення якості крупних сталевих зливків, зокрема їх фізичної, хімічної та структурної однорідності. Результати його робіт представлені більш ніж у 270-ти наукових працях, у тому числі 3-х монографіях, 3-х підручниках і більш ніж 40-а патентах та авторських свідоцтвах.

Основну наукову діяльність Віктор Олександрович успішно поєднує з науково-освітньою. Він є заступником голови докторської ради Д 26.182.01 при ІЕЗ ім. Є.О. Патона. У 2010–2019 рр. він викладав курс «Позапічне оброблення металів» студентам НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Він є гарантом програми «Металургія» за третім освітньо-науковим рівнем вищої освіти доктора філософії ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Постійно приділяє увагу роботі з молоддю в інституті та входить до складу комісії по роботі з науковою молоддю інституту. Під його керівництвом захищено 4 кандидатські та одна докторська дисертації.

Щиро вітаємо ювіляра, бажаємо міцного здоров'я, творчої наснаги та успіхів у всіх напрямках діяльності.

*Колектив ІЕЗ ім. Є.О. Патона  
та редакція журналу «Сучасна електрометалургія»*

## РОЗВИТОК В ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

З середини ХХ століття необхідність підвищення технічних характеристик (надійності, потужності, експлуатаційного ресурсу та ін.) авіаракетних двигунів, газових турбін, устаткування атомної енергетики стала каталізатором для створення нових матеріалів, захисних покриттів та технологій їх отримання. Б.Є. Патон ще з 1950-х років приділяв велику увагу дослідженням фізичних процесів взаємодії потоку прискорених електронів великої потужності з металами та сплавами з метою розробки нових технологій для зварювання та отримання нових матеріалів.

Починаючи з цього часу в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) розпочалися розробки електронно-променевих технологій: зварювання (Г.В. Криштаб, В.Є. Локшин, Ю.М. Ланкін, В.І. Чалов, О.К. Назаренко), переплаву для рафінування металів та сплавів, випаровування (атомізації) з наступним фізичним осадженням парової фази у вакуумі (ЕВ-РВД — Electron Beam-Physical Vapor Deposition).

У 1961 р. в ІЕЗ створено відділ № 13 електронно-променевих парофазних технологій, який в період 1961–1994 рр. очолював Б.О. Мовчан. В 1962 р. введена в дію установка, призначена для випаровування та конденсації неорганічних речовин у вакуумі.

Великий вплив на подальший інтенсивний розвиток цих напрямків надала зустріч Б.Є. Патона з

головним конструктором ракетно-космічних систем С.П. Корольовим, що відбулася в кінці 1962 р., на якій обговорювались проблеми зварювання та створення нових конструкційних матеріалів та покриттів.

Використання електронно-променевої технології для випаровування металевих та неметалевих (оксиди, карбіди, бориди) речовин з наступною конденсацією парової фази у вакуумі відкрили можливості створення нових матеріалів та покриттів з унікальними властивостями, які неможливо отримати іншими методами. Парова фаза не має обмежень у взаємній розчинності компонентів, а парові потоки легко модулювати та розподілити в просторі по заданому закону. Тому випаровуванням та конденсацією можливо отримувати статистично гомогенні тверді розчини в широкому інтервалі концентрацій компонентів, дисперсні, мікрочарові та аморфні матеріали.

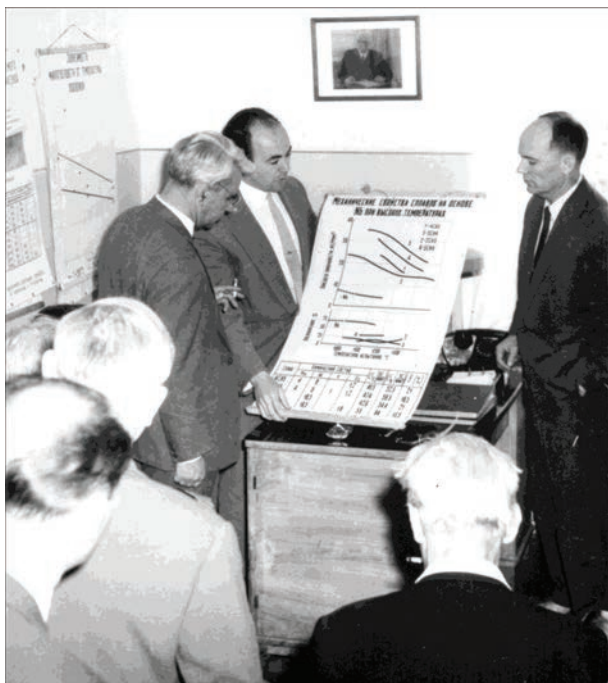
Протягом 1960–1970 рр. проведено систематичні дослідження структури та властивостей (міцність, пластичність, повзучість, мікротвердість, жаростійкість) одно- та двофазних матеріалів на основі заліза, нікелю, кобальту, міді, хрому, молібдену та ін., з добавками оксидів та карбідів інших металів, при кімнатній та високій температурі.

Б.О. Мовчаном та О.В. Демчишиним встановлено схематичну залежність структури конденсованого матеріалу від гомологічної температури його осадження, яка стала класичною та визнана у всьому світі.

У 1964 р. в ІЕЗ прибув президент АН СРСР М.В. Келдиш, який цікавився можливістю плакування ванадієм сталевих корпусів ядерних реакторів і паливних елементів. У реакторах, охолоджуваних рідкими металами, ванадій і його сплави практично не взаємодіють із ядерним паливом, а при температурах 1000...1200 К мають високу стійкість проти корозії в рідкометалевих теплоносіях.

Б.Є. Патон за пропозицією М.В. Келдиша організував при Президії АН СРСР Наукову раду з проблеми «Нові процеси отримання і обробки металевих матеріалів», яка об'єднала вчених академічних установ із фахівцями багатьох інших відомств і сприяла розвитку науки про матеріали. У 1964 р. Б.О. Мовчана було обрано членом-кореспондентом, а 1978 р. — академіком НАН України.

У 1971–1974 рр. досліджено процеси електронно-променевого напилення та властивості вакуумних конденсатів на основі заліза, тугоплавких оксидів, карбідів та боридів, розроблено жаростійкі покрит-



На фото ліворуч: М.В. Келдиш, Б.О. Мовчан, Б.Є. Патон (1964 р.)

тя, створено апаратуру та технологію нанесення покриттів та отримання композитних матеріалів (Б.Є. Патон, Б.О. Мовчан).

Паралельно з науковими дослідженнями та розробкою нових технологій у відділі № 13 проводили конструкторські розробки та виготовлення електронно-променевих установок, поліпшували їх висковольтні джерела живлення та системи керування електронним променем. Для цього до складу відділу було включено групу конструкторів (Ю.М. Кривошликов, П.А. Кучеренко), які тісно співпрацювали з науковими співробітниками (О.Л. Тихоновський, А.В. Демчишин). Технологія електронно-променевого рафінування металів та сплавів дозволила покращити їх властивості та почала впроваджуватись у виробництво. Вже у 1965 р. вступила в дію перша промислова установка В-270 для отримання рафінованих зливків ніобію та танталу діаметром 150 мм на Донецькому хіміко-металургійному заводі (м. Волноваха). В 1969 р. була прийнята в експлуатацію установка И-254 на металургійному заводі «Електросталь» (м. Електросталь) для отримання зливків жароміцних сплавів діаметром до 380 мм.

В 1974 р. колективу авторів була присвоєна державна премія УРСР в галузі науки і техніки за розробку та впровадження електронно-променевих технологій та обладнання для отримання чистих металів і сплавів (Б.О. Мовчан, О.Л. Тихоновський, В.О. Тимашов, Ю.М. Кривошликов).

Були сконструйовані та запатентовані прості та надійні в експлуатації плоскопроменеві електронні гармати (Б.О. Мовчан, В.О. Тимашов). Наступні модифікації цих електронно-променевих гармат відрізняються лише незначними змінами та успішно експлуатуються по цей час.

У 1979 р. розроблено електронно-променевий метод отримання мікрошарових композиційних матеріалів типу метал/метал або метал/окис з товщиною шару порядку 1 мкм, вивчено основні механічні властивості цих матеріалів та встановлено явище надпластичності (Б.Є. Патон, Б.О. Мовчан).

У 1978–1983 рр. розроблено наукові основи електронно-променевої технології одержання пористих металокерамічних матеріалів з широкою гамою фізико-механічних властивостей. Завершено дослідження фізичного механізму виявленого явища максимальної пластичності двофазних матеріалів за умови рівності середнього розміру зерна середній вільній відстані між частинками другої фази. Отримані результати дозволили створити нові конструкційні матеріали на основі металевих матриць (Б.Є. Патон, Б.О. Мовчан).

Розроблено композиційні теплозахисні покриття та електронно-променеву технологію їх осадження на ло-

патки турбін та інші вузли і деталі високотемпературної техніки, що дозволило збільшити їх надійність і підвищило ресурс експлуатації в 5...10 разів (Б.О. Мовчан, І.С. Малашенко). У 1979–1982 рр. вступили в дію 15 промислових багатокамерних установок типу УЕ-137 та УЕ-175 для нанесення металевих і керамічних покриттів на лопатки авіаційних газотурбінних двигунів та енергетичних установок на заводах Мінавіапрому, Мінсудпрому та Мінгазпрому (Москва, Самара, Пермь, Рибінськ, Литкаріно, Миколаїв, Камишин, Глазов, Вороніж). Було розроблено та передано замовникам відповідні технології нанесення захисних покриттів на вироби нової техніки. Слід зазначити, що завдяки тісній співпраці вчених відділу № 13 з двигунобудівними КБ ім. М. Кузнецова вперше у світі здійснено політ літака з авіаційним газотурбінним двигуном, який мав лопатки з теплозахисним керамічним покриттям.

Цикл цих робіт у 1984 р. був оцінений присудженням співробітникам відділу № 13 Ленінської премії за нові матеріали та покриття (Б.А. Мовчан, І.С. Малашенко). У 1983 році вийшла друком книга Б.А. Мовчана та І.С. Малашенка «Жаростійкі покриття, що осаджуються у вакуумі». Продовженням робіт зазначеного напрямку були дослідження І.С. Малашенко, М.І. Гречанюка, В.В. Грабіна, В.І. Топала, К.Ю. Яковчука, що дозволили підвищити надійність захисних покриттів та їх робочу температуру.

У Московському науково-виробничому об'єднанні «Астрофізика» успішно застосовувалася електронно-променева технологія нанесення покриттів на дзеркала силової металооптики.

У 1989 р. за цикл робіт «Структура і властивості неорганічних матеріалів, осаджених із парової фази у вакуумі» Б.А. Мовчану присуджено премію ім. Є.О. Патона АН УРСР.

У 1987–1992 рр. розроблялася та була запропонована до промислового застосування технологія намерзання заготовок з жаростійких матеріалів для подальшої термомеханічної обробки та виготовлення важконавантажених дисків роторів газових турбін (В.А. Панна).

У 1988–1992 рр. успішно розроблялася електронно-променева технологія легування зварювальних дротів рідкоземельними елементами (В.І. Ульянов, І.В. Гуляєв, А.Ф. Манулик, Є.В. Онопрієнко).

ІЕЗ спільно з такими провідними спеціалізованими організаціями України як Запорізький моторобудівний завод ім. П.І. Баранова (тепер АО «Мотор Січ»), «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес», Південний турбінний завод (тепер ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машпроект»»), Сумський машинобудівний завод ім. М.В. Фрунзе, Сумський завод важкого компресорного будування (тепер Публічне

Акціонерне Товариство «Сумське НВО») проводили дослідницькі та дослідно-промислові роботи зі створення ремонтних технологій з метою продовження ресурсу газотурбінних двигунів та технологій отримання суцільнозварних моноблоків газотурбінних установок (ГТУ) із перспективних матеріалів. Продовження ресурсу ГТУ передбачало багаторазове відновлення експлуатаційних характеристик соплових та робочих лопаток, елементів дисків, жарових камер, ущільнювальних елементів та інших високонавантажених деталей та вузлів, у тому числі із жароміцних нікелевих сплавів.

У 1988 р. здійснено комплекс фізико-хімічних досліджень біметалевих матеріалів системи сталь-нікель, на основі яких розроблено технологію електронно-променевого нанесення захисних нікелевих покриттів на низьковуглецеві сталеві стрічки для корпусів хімічних джерел струму (А.В. Демчишин).

У 1990 р. були сконструйовані та виготовлені для ВО «Катіон» (м. Хмельницький) дві електронно-променеві установки для отримання алюмінієвої катодної фольги з великою питомою площею (Б.О. Мовчан, М.І. Гречанюк, Г.М. Гордієнко, С.М. Рязанцев), що дозволило значно збільшити питому ємність і зменшити габарити серійно вироблених електролітичних конденсаторів.

У 1991 р. була розроблена електронно-променева технологія синтезу товстих (10...500 мкм) надпровідних плівок системи Y–Ba–Cu–O шляхом випаровування вихідної кераміки з одного джерела (Б.О. Мовчан, М.І. Гречанюк, В.В. Грабін, С.Є. Литвин).

У тому ж році розроблено методи високошвидкісного випаровування металів та багатокомпонентних сплавів, що дозволили у 2...10 разів підвищити швидкість їх випаровування (Б.А. Мовчан, М.І. Гречанюк, В.І. Топал, А.В. Корж, В.А. Осокін). Сучасні електронно-променеві випарники дозволяють виробляти до 10...25 кг металевої пари на годину та здійснювати конденсацію зі швидкістю 10...60 мкм/хв.

У 1992 р. М.І. Гречанюку присуджено Державну премію України в галузі науки і техніки за технологію виготовлення матеріалів для атомної енергетики. Розроблено технологію осадження алмазоподібних покриттів (Ю.Б. Чуйков).

У 1999–2003 рр. розроблена технологія електронно-променевого формування твердих градієнтних покриттів на сталевих підкладках на основі системи TiC–Cu шляхом сумісного випаровування з окремих джерел і осадження в вакуумі карбіду титану та міді. Висока мікротвердість верхніх шарів покриття (20...23 ГПа) обумовлена його композитною мікроструктурою, яка складається з твердої матриці на основі TiC і міді та локалізується на межах зерен. Висока адгезійна міцність покриття досягається

шляхом утворення поблизу підкладки пластичного шару з підвищеною концентрацією міді, в яких мікротвердість знижується до 6...13 ГПа.

Для прискореного впровадження в промисловість результатів наукових і технологічних досліджень на території ДП «Дослідного заводу спецелектрометалургії ІЕЗ» у 1983 р. було створено цех електронно-променевих технологій.

У 1993 р. на базі цього цеху було створено спільний Українсько-Американський дослідницький центр «Пратт і Уїтні-Патон», який виконував роботи з нанесення захисних покриттів на лопатки авіаційних двигунів літаків японських, американських та сингапурських авіаліній.

В 1995 р. за угодою Національної академії наук України та Пенсільванського Університету (США) створена лабораторія електронно-променевого випаровування і осадження в Пенсільванському Університеті.

На базі відділу № 13 ІЕЗ у 1994 р. створено Державне науково-дослідне та проектно-конструкторське підприємство «Міжнародний центр електронно-променевих технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона» (МЦ ЕПТ). Розширилися дослідження фундаментальних та прикладних наукових процесів, що відбуваються при випаровуванні речовин електронним променем у вакуумі, розробок нових матеріалів та захисних покриттів, отримуваних за допомогою технологій електронно-променевого випаровування та конденсації, а також для створення та виготовлення нового електронно-променевого обладнання. Під науковим керівництвом Б.О. Мовчана та з 2003 р. К.Ю. Яковчука МЦ ЕПТ досяг міжнародного визнання як у галузі розробок та досліджень нових варіантів аморфних, нанокристалічних, дисперсно-зміцнених, шаруватих, пористих матеріалів та захисних покриттів, осаджуваних з парової фази у вакуумі, так і в реалізації розроблених технологічних процесів та експериментальних зразків електронно-променевого обладнання потужністю 120...250 кВт.

Серед замовників на виконання науково-дослідних робіт з електронно-променевої тематики слід відзначити такі відомі компанії, як «Дженерал Електрик», «Пратт і Уїтні», «Хромаллой» (США), «Роллс-Ройс» (Англія), «Ел Джи» (Південна Корея), науково-дослідні інститути та університети інших країн.

МЦ ЕПТ виготовив і поставив зарубіжним (КНР, США, Канада, Індія) та українським замовникам 23 лабораторних, дослідно-промислових та промислових електронно-променевих установок, провів навчання зарубіжних спеціалістів.

Ці установки експлуатуються для промислових та науково-дослідних цілей в таких компаніях, як «Дженерал Електрик», «Ханівелл», Пенсільван-

ський Університет (США), Аерокосмічний дослідний центр (м. Монреаль, Канада), Міжнародний дослідний центр порошкової металургії (м. Хайдарабад, Індія), Пекінський інститут аерокосмічних матеріалів, Пекінський університет астронавтики та аеронавтики, Пекінський інститут авіаційних технологій (КНР) та на багатьох китайських машинобудівних підприємствах. Ліцензії на методи нанесення металевих та керамічних захисних покриттів продано замовникам в США та КНР.

На початку 2000-х років у відділі парофазних неорганічних матеріалів були виготовлені конденсовані матеріали з квазікристалічною структурою (Б.О. Мовчан, А.І. Устинов). Унікальне поєднання властивостей таких матеріалів відкрило нові можливості при створенні на їх основі функціональних матеріалів різного призначення.

Оскільки квазікристалічні структури існують у вузькому концентраційному інтервалі сплавів на основі багатокомпонентних систем (область гомогенності не перевищує  $\pm 1$  ат. %), необхідно було розробити прецизійні методи його електронно-променевого випаровування.

У 2001 р. вперше було отримано товсті покриття з квазікристалічною структурою на основі системи Al–Cu–Fe (А.І. Устинов, В.І. Чаплюк, Т.В. Мельниченко, С.С. Поліщук) та розроблено високошвидкісний процес (до 30 мкм/хв) їхнього осадження. Виявилось, що шляхом зміни умов осадження покриттів їх структуру можна модифікувати, подрібнюючи, наприклад, зерна до нанорозмірного масштабу, створюючи гетерофазні структури на основі кристалічної та квазікристалічної фаз тощо. Це дозволило встановити взаємозв'язок між властивостями покриттів та характеристиками структури. Надалі на основі отриманих закономірностей були розроблені покриття, які істотно збільшували термін служби інструментів (прес-форм для виготовлення виробів з армованих вуглецем пластмас, штампів для виготовлення прецизійних деталей гарячим штампуванням), дозволяли уникнути холодного зварювання деталей вузлів тертя, що працюють в умовах вакууму і т.п. (Демченков С.О. спільно з європейськими партнерами у рамках програми РП7).

З середини 2000-х років почались розробки методів синтезу металоорганічних твердо- та рідкофазних композитів з наночастинками, отриманими електронно-променевим осадженням, з метою їх наступного використання в медицині та фармацевтиці. В цей період спільно з Інститутом експериментальної



Б.О. Мовчан з призом «Відзнака Р.Ф. Банша за новаторські роботи в галузі електронно-променевого осадження та за діяльність керівника та наставника на протязі 60 років на трьох континентах» від американського Advanced Surface Engineering Division (2016 р.)

патології, онкології та радіобіології ім. Р.Є. Кавецького НАН України (м. Київ), розроблений «Спосіб отримання стабілізованого розчину наночастинок магнетиту для адресної доставки протипухлинних препаратів, включно з використанням наночастинок магнетиту в полімерній оболонці».

Спільно з Львівським національним медичним університетом ім. Д. Галицького розроблена технологія виготовлення мазей, гелів, емульсій антимікробної та протизапальної дії для нанесення на шкіру.

У МЦ ЕПТ (2010–2020 рр.) досліджені структури та властивості розробленого варіанту градієнтного термобар'єрного покриття  $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  для лопаток газотурбінних двигунів; виконано цикл досліджень з оптимізації структури та властивостей градієнтного твердого ерозійно-стійкого та демпфуючого покриття на основі карбіду бора та розроблено основи одностадійної електронно-променевої технології його осадження (Б.О. Мовчан, Ю.Е. Рудой, К.Ю. Яковчук, А.В. Микитчик).

Розробки ІЕЗ захищені патентами США, Європи, КНР та України.

*О.М. Корнієнко*

## ТРИНАДЦЯТА КОНФЕРЕНЦІЯ СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ, МОЛОДИХ УЧЕНИХ ТА СПЕЦІАЛІСТІВ «НАДТВЕРДІ, КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ТА ПОКРИТТЯ: ОТРИМАННЯ, ВЛАСТИВОСТІ, ЗАСТОСУВАННЯ»

Тринадцята міжнародна конференція студентів, аспірантів, молодих учених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» відбулася у Києві 24 жовтня 2025 р. на базі Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. Участь у ній взяли представники наукових установ України, Казахстану та Польщі. Цьогоріч організатори отримали 42 наукові доповіді, що перевищує показники попередніх років. Програма конференції охоплювала вісім основних напрямів: «Матеріалознавство та технології отримання надтвердих, композиційних матеріалів, конструкційної та інструментальної кераміки, твердих сплавів», «Нанотехнології, нано- та смарт матеріали», «Фазові рівноваги та фазові перетворення в умовах високих тисків (фази високого тиску)», «Фізика та техніка високих тисків», «Захисні покриття, плівки з надтвердих та інших матеріалів», «Інформаційні технології та моделювання технологічних процесів отримання високотвердих і високоміцних матеріалів», «Методологія досліджень властивостей матеріалів» та «Застосування надтвердих і керамічних матеріалів та твердих сплавів у промисловості».

Конференція проходила у змішаному форматі, онлайн за допомогою Google Meet та офлайн у Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

У межах конференції розглядалися теми лазерного наплавлення, структурно-фазових перетворень у надтвердих сплавах, технологій спікання надтвердих покриттів, продовження строку роботи надтвердих матеріалів, включаючи біосумісні матеріали, нанесення покриттів та адитивне виробництво. Обговорювалися властивості титан-цирконієвих і нікелевих сплавів, кубічного нітриду бору, високоентропійних сплавів, вплив термомеханічної обробки на їх мікроструктуру, а також технології плазмового напилення та електрошлакового переплаву. Серед інститутів, які представили свої результати, були: Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Український державний університет науки і технологій, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а також університети Казахстану та Польщі.

Науковці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України зосередили увагу на комплексному аналізі проблем, пов'язаних із підвищенням ефективності та надійності сучасних металургійних і зварювальних технологій з використанням надтвердих матеріалів. Одним з розглянутих питань були можливості використання надтвердих порошків для створення вітчизняних аналогів закордонних ріжучих деталей сільськогосподарської техніки. Було описано основні методи ріжучих кромок деталей сільськогосподарської техніки, показано потенціал використання лазерного наплавлення для ріжучих кромок, проведено експериментальне наплавлення і підтверджено актуальність процесу лазерного наплавлення порошків надтвердих металевих матеріалів для формування ріжучих кромок інструментів деталей сільськогосподарської техніки.

Інша група досліджень стосувалася питань вивчення впливу параметрів режиму мікроплазмового напилення (МПН) на формування резистивного покриття із діоксиду титану. Встановлено, що найбільш вагомими параметрами МПН, які впливають на процес формування щільності структури в покриттях із  $TiO_2$ , є сила струму та дистанція напилення.

Також науковцями ІЕЗ було представлено результати досліджень фазового складу, мікроструктури та механічних властивостей литого високоентропійного сплаву  $FeCoNiMnCrWB$ , де було встановлено утворення боридних фаз  $WB$ ,  $FeW_2B_2$  та  $(Cr,Fe)_{23}B_6$ . Даний сплав характеризується високою твердістю (24,1 ГПа) і нанокристалічним станом, що робить його перспективним для роботи в умовах інтенсивних навантажень.

Загалом, конференція «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» підтвердила свою роль як важливий науковий майданчик для молодих дослідників у галузі матеріалознавства та інженерії поверхні. Вона об'єднала фахівців з провідних українських і закордонних установ, які представили 42 доповіді, присвячені актуальним проблемам сучасних надтвердих матеріалів, технологій нанесення матеріалів, діагностики та варіантів подовження їх експлуатації. Отримані результати й обговорення показують високий рівень української науки та її інтеграцію у глобальний науковий простір.

*М.В. Соколовський*  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України