

ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ

№ 1
2020

Видається з 1985 року
4 випуски на рік

Сучасна електрометалургія ◇ Современная электрометаллургия ◇ Electrometallurgy Today

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. Устїнов,
В.О. Шаповалов;**

М.І. Гасик, Національна металургійна академія
України, м. Дніпро,

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

В.І. Дубодєлов, ФТМС НАНУ, м. Київ,

М. Зініград, Аріельський університет, Ізраїль,

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

П.І. Лобода, НТУУ

«КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ,

Г. Младенов, Інститут електроніки,
м. Софія, Болгарія,

О.В. Овчинников, ЗНТУ, м. Запоріжжя,

Г.Ф. Тавадзе, Інститут металургії
і матеріалознавства

ім. Ф.Тавадзе, м. Тбілісі, Грузія,

С.Я. Шипицин, ФТМС НАНУ, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання

ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Редакція

Д.М. Дяченко,

Л.М. Герасименко, Т.Ю. Снегірьова

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ,

03150, Україна, Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 200 82 77, 205 22 07

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

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

ISSN 2415-8445

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

Передплата

Передплатний індекс 70693

4 випуски на рік (видається щоквартально)

Друкована версія: 800 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки

рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 800 грн. за річний комплект

ЗМІСТ

Збори, присвячені 150-річчю від дня народження
Є.О. Патона 3

Медовар Л.Б., Ахонін С.В. Патонівська металургія 4

ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

*Лісова Л.О., Стовпченко Г.П., Гончаров І.О., Гусєв Я.В.,
Медовар Л.Б.* Термодинаміка взаємодії та фізичні властивості
шлаків системи $30\text{CaF}_2/30\text{CaO}/30\text{Al}_2\text{O}_3$ (SiO_2 , MgO) при
електрошлаковому переплаві 8

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В., Петриченко І.К.
Термічна обробка отриманого способом ЕПП високоміцного
псевдо-β-титанового сплаву та його зварних з'єднань 14

ВАКУУМНО-ІНДУКЦІЙНА ПЛАВКА

*Шаповалов В.О., Шейко І.В., Якуша В.В., Гніздило О.М.,
Никитенко Ю.О.* Інноваційна технологія та устаткування
для виробництва супервеликих монокристалів тугоплавких
металів 26

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТАЛУРГІЇ

Гречанюк І.М., Гречанюк В.Г. Корозійна та ерозійна стійкість
конденсованих з парової фази композиційних матеріалів
на основі міді й молібдену 32

ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

*Кутузов С.В., Деркач В.В., Гасик М.І., Горобець А.П.,
Гасик М.М.* Дослідження режимів прокатки термоантрацит
для виробництва безперервних самовипалювальних
електродів рудовідновних печей 39

НОВІ МАТЕРІАЛИ

Ремізов Д.О., Богомол Ю.І., Лобода П.І. Вплив швидкості
кристалізації на мікроструктуру та властивості сплаву
Ti–TiB 46

ІНФОРМАЦІЯ

Біктагірову Ф.К. — 70! 52

НАУКА – ВИРОБНИЦТВУ

Інженерний центр електронно-променевого зварювання
ІЕЗ ім. Є.О. Патона 53

Науково-виробничий центр «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона 55

Міжнародний центр електронно-променевих технологій
ІЕЗ ім. Є.О. Патона 57

Патон Турбайн Текнолоджіз 59

ETODAY ELECTROMETALLURGY

№ 1
2020

Published since 1985
4 times a year

Electrometallurgy Today ◇ Suchasna Elektrometalurhiya ◇ Sovremennaya Elektrometalurgiya

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.I. Gasyk, National Metallurgical Academy
of Ukraine, Dnipro,

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

V.I. Dubodelov, Physico-Technological Institute
of Metals and Alloys of NASU, Kyiv,

M. Zinigrad, Ariel University, Israel,

O.M. Ivasishyn, G.V. Kurdyumov Institute
for Metal Physics of NASU, Kyiv,

P.I. Loboda, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv,

G. Mladenov, Institute of Electronics
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,
O.V. Ovchynnikov, Zaporozhye National Technical
University, Ukraine,

G.F. Tavadze, Ferdinand Tavadze Institute
of Metallurgy and Materials Science of NAS
of Georgian, Tbilisi, Georgia,

S.Ya. Shpytsyn, 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,
L.M. Gerasymenko, T.Yu. Snegiryeva

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
03150, Ukraine, Kyiv,
11 Kasimir Malevich Str.
Tel./Fax: (38044) 200 82 77, 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

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

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

Subscription index 70693

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

\$60, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$50, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

CONTENTS

To the 150th Anniversary of Academician E.O. Paton 3

Medovar L.B., Akhonin S.V. Paton metallurgy 4

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

*Lisova L.O., Stovpchenko G.P., Goncharov I.O., Gusiev Ia.V.,
Medovar L.B.* Thermodynamics of interactions and physical properties
of slags of 30CaF₂/30CaO/30Al₂O₃ (SiO₂, MgO) system at electrosag
remelting 8

ELECTRON BEAM PROCESSES

Akhonin S.V., Bilous V.Yu., Selin R.V., Petrichenko I.K. Heat treatment
of high-strength pseudo-β-titanium alloy produced by EBM process
and of its welded joints 14

VACUUM- INDUCTION MELTING

*Shapovalov V.O., Sheiko I.V., Yakusha V.V., Gnizdilo O.M.,
Nykytenko Yu.O.* Innovative technology and equipment for growing
super-large single-crystals of metals 26

GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY

Grechanyuk I.M., Grechanyuk V.G. Corrosion and erosion resistance of
copper and molybdenum composite materials condensed from the vapour
phase 32

ENERGY-RESOURCES SAVING

Kutuzov S.V., Derkach V.V., Gasyk M.I., Gorobets A.P., Gasyk M.M.
Research of the influence of thermoanthracite calcination modes for
the production of continuous self-baking electrodes for ore reducing
furnaces 38

NEW MATERIALS

Remisov D.O., Bogomol Yu.I., Loboda P.I. Influence of crystallization rate
on the microstructure and properties of Ti-TiB alloy 46

INFORMATION

Biktagirov F.K. is 70! 52

SCIENCE FOR PRODUCTION

Engineering Center of Electron Beam Welding of E.O. Paton Electric
Welding Institute 53

Research and Production Center «Titanium» of E.O. Paton Electric
Welding Institute 55

International Center for Electron Beam Technologies of E.O. Paton
Electric Welding Institute 57

Paton Turbine Technologies 59

ЗБОРИ, ПРИСВЯЧЕНІ 150-РІЧЧЮ ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ Є.О. ПАТОНА

5 березня 2020 р. у конференц-залі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відбулися Загальні збори НАН України, присвячені 150-річчю від дня народження всесвітньо відомого вченого в галузі мостобудування та зварювання академіка НАН України Євгена Оскаровича Патона. У зборах прийняли участь співробітники ІЕЗ, академічних інститутів, КПП ім. Ігоря Сікорського та представники підприємств зварювальної індустрії України. Також у зборах прийняв участь академік Борис Євгенович Патон, якого присутні привітали тривалими оплесками.

З привітанням до учасників Загальних зборів звернувся віце-президент Національної академії наук України академік **А.Г. Наумовець**. Він наголосив, що академік Євген Оскарович Патон, знаний і авторитетний фахівець з мостобудування та електрозварювання, фундатор і керівник першого в світі наукового інституту електрозварювання, засновник і керівник кафедр мостів та електрозварювання Київського політехнічного інституту все своє життя присвятив інженерній, науковій та організаційній діяльності, підготовці молодих вчених і фахівців у галузі мостобудування та електрозварювання.

У своїй доповіді «Патони і Київський політехнічний інститут» ректор НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» академік **М.З. Згуровський** висвітлив «чи найславетнішу сторінку історії Київського політехнічного інституту», яка розпочалася у 1905 р., коли директор Київського політехнічного інституту К.О. Зворикін запросив молодого професора Московського інженерного училища шляхів сполучень Євгена Оскаровича Патона працювати у КПП.

Повноту образу академіка Є.О. Патона можна скласти, лише розглядаючи його діяльність у комплексі як ученого, інженера-практика, педагога, державного та громадського діяча, наголосив у своїй доповіді «Суспільне значення творчої спадщини академіка Євгена Оскаровича Патона» академік **О.С. Онищенко**. Академік Є.О. Патон був справжнім дипломатом від науки. Не раз йому доводилося зустрічати спротив консервативних кіл. Але йому вдавалося переконати високопосадовців і керівників промпідприємств у перевагах пропонованих ним технологій. І неодноразово приймалися урядові рішення, спрямовані на впровадження патонівських науково-технічних здобутків. Показовою може бути постанова Ради Міністрів СРСР від 27 березня 1952 р. про заходи щодо впровадження в народне господарство нових способів електрозварювання. Академік Є.О. Патон — зіркова постать історії науки. Він утвердив епоху електрозварювання в способах виробництва, наповнив її науковими технологіями та високопродуктивним устаткуванням. Створив прообрази техніки майбутнього — механізми-автомати, які переросли в роботи. Відкрив, що методи з'єднання матеріалів і матеріали для з'єднання невичерпні.

З доповіддю «Життєвий та творчий шлях видатного вченого Є.О. Патона» виступив академік-секретар Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства академік НАН України **Л.М. Лобанов**.

Спогадами про особисті зустрічі з Є.О. Патонем, стиль його роботи та керівництва поділився перший заступник директора ІЕЗ академік **С.І. Кучук-Яценко**.

По закінченню зборів до присутніх звернувся **Борис Євгенович Патон**. Він подякував за участь у зборах з нагоди дня народження його батька — академіка Євгена Оскаровича Патона. Борис Євгенович побажав усім здоров'я, успіхів та наголосив, що чесне служіння науці — це велика радість, величезна, часом виснажлива, праця на все життя!



Президія зборів (зліва направо): Л.М. Лобанов, А.Г. Наумовець, Б.Є. Патон, М.З. Згуровський, О.С. Онищенко, С.І. Кучук-Яценко

5 березня 2020 р. вчені та виробничники в галузі зварювання відсвяткували 150-річчя з дня народження засновника нашого Інституту — Євгена Оskarовича Патона. В цій статті зроблено спробу проаналізувати деякі риси цієї видатної людини, що сприяли виникненню саме металургійної потужної складової в барвистому спектрі наукових напрямків Інституту, а також окреслені перспективи металургійних розробок, що проводять дослідники Інституту сьогодні.

Є.О. Патон був водночас вченим й інженером з надзвичайно широкими інтересами в різних галузях людської діяльності. Відповідним був і його кругозір. Тому й направив він дослідження свого Інституту на проблему якості сталей, що підлягають зварюванню. Металургія тоді видавалась хоча й спорідненою галуззю науки, але все ж таки достатньо далекою. Сьогодні ж очевидно є тотожність металургійних процесів при отриманні металевих зливок та виливків і зварюванні металів з їх розплавленням і наступним твердінням у зварному шві. Різниця, за виключенням розмірів, практично немає, особливо у випадку зварювання металів одного хімічного складу за допомогою зварювального електроду/дроту того ж хімічного складу, або ж без нього електронним чи лазерним променем. В той же час, у більшості випадків майже вирішальний вплив на якість зварного з'єднання та зварної конструкції в цілому має металургійна якість самих металів, що взаємодіють в процесі зварювання. Тому дослідники Патонівського інституту сміливо взялися за проблему якості сталей для зварювання й почали активно працювати з металом для зварних конструкцій. Найяскравішим прикладом їх зусиль стало створення наприкінці 40-х років минулого сторіччя найпоширенішої й сьогодні на теренах колишнього СРСР високоміцної низьколегованої сталі 09Г2С. Зазначимо також, що зварники й металурги за десятиріччя виробництва та використання добре вивчили не тільки позитивні, але й негативні властивості цієї сталі, особливо схильність до утворення т.з. ламелярних або ж шаруватих трісок, що зумовлені ліквідацією кремнію. Тому не дивною була спроба покращити цю сталь, що призвела майже 30 років потому до дослідників Інституту до створення сталі 09Г2СЮЧ.

Ми підкреслюємо тут роль зварювальників тому, що зазвичай створенням нових сталей займаються металознавці й металурги, іноді ливарники. В той же час саме подібність металургійних процесів при литті, зварюванні та власне металургії доводить вірність наукової позиції Євгена Оskarовича Патона, який не допускав обмеження наукового та інженерного пошуку. Прямо з цієї точки зору та з огляду на сучасні тенденції розвитку науки видається нагальним припинити штучний поділ наук на фундаментальні та прикладні. Наука єдина і якщо порівняти в застарілих, на наш погляд, термінах її фундаментальні та прикладні, тобто інженерні складові з природою, то це два рівно значущих крила могутнього птаха (недарма ж ще знання геометрії еліптичного світу відзначались й видатними інженерними досягненнями). Без перебільшення ми можемо сказати, що дуже різні досягнення цивілізації, як, наприклад, унікальні літаки, мобільні телефони, хмарочоси і комп'ютери з'явилися тільки завдяки поєднанню досягнень науки та інженерії.

Повернемось все ж таки до сталі 09Г2СЮЧ, яка в деяких зразках давала дуже вдалі показники механічних властивостей у порівнянні зі сталлю 09Г2С. Але в цьому випадку якраз відсутність тісної взаємодії з металургами нашкодила зварювальникам. Вони не взяли до уваги багаторічний досвід металургів в зусиллях використати легування рідкоземельними елементами, що свідчив про неможливість досягнення стабільних позитивних результатів при легуванні великих об'ємів металу. Знову ж таки з причин схильності легуючих рідкоземельних елементів до ліквідації. Ми навели ці два приклади для ілюстрації одного з напрямків металургійних пошуків патонівців — створення нових конструкційних матеріалів для зварних конструкцій. Цей шлях продовжується і розвивається і зараз. Наведемо ще два приклади, які стосуються принципових для металургії напрямків, а саме створення й використання високоміцних низько- й середньолегованих сталей. Перш за все торкнемося проблеми використання т.з. карбонітридного зміцнення сталей, яке зазвичай базується на легуванні сталей ванадієм, ніобієм, титаном та азотом. Найвідомішою й найпоширенішою сталлю цього типу є сталь 16Г2АФ. Механічні властивості цієї сталі щонайменше на 20 % перевищують властивості сталі 09Г2С. Але з самого початку широкого впровадження цієї сталі, особливо в вигляді товстолистового прокату для відповідальних конструкцій, саме зварники патонівського інституту першими зрозуміли вади цієї сталі в зварних з'єднаннях, особливо при значних перерізах, що проявились в ліквідації азоту при розплавленні основного металу. В той же час сталі з карбонітридним зміцненням чудово проявили й проявляють себе в литому вигляді й там, де зварювання непотрібне, широко використовуються для виготовлення різноманітного лиття відповідального призначення.

Інший приклад вдалого створення нових сталей патонівцями є винайдення товстолистової сталі 03X20H16AG6 для елементів надпровідних магнітних систем термоядерного реактору проекту ITER, промислова реалізація технології її виплавки й отримання великогазових листових зливок, їх прокатки на товстий лист й подальшого електрошлакового зварювання. Робота ця безумовно націлена на перспективу й має знайти своє місце при поновленні участі України в роботах за міжнародним проектом створення повномасштабного ТОКОМАКу.

Цей напрям металургійних досліджень вдало доповнюють роботи, що націлені на створення нових титанових сплавів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Характерною рисою цих сплавів є те, що вони добре зварюються.

Перші дослідження, виконані в ІЕЗ ім. Е.О. Патона з метою створення нових більш ефективних сплавів на основі титану, були спрямовані на розробку сплавів для зварювального дроту. Задача полягала в тому, щоб підвищити ступінь легування дроту і таким чином при зварюванні середньо- і високолегованих сплавів збільшити міцність швів, не знижуючи показників пластичності. За результатами цих досліджень було розроблено титановий сплав марки СП15 системи $\text{Ti-5Al-2Mo-2V-3,5Nb-1Zr}$. Застосування дроту з цього сплаву при зварюванні середньо- і високолегованих титанових сплавів забезпечує найкраще сполучення міцності і пластичності швів у порівнянні з дротами, передбаченими закордонними стандартами.

Подальші дослідження показали, що сплав СП15 має комплекс характеристик, що дозволяють застосовувати його не тільки у вигляді зварювального дроту. У литому стані сплав СП15 за показниками міцності і пластичності перевищує усі відомі ливарні сплави. Тому він дуже ефективний для великогабаритного фасонного литва, зокрема силових елементів виробів відповідального призначення. Не менш важливою особливістю сплаву СП15 є його висока корозійна стійкість в агресивних середовищах, що перевищує стійкість технічного титану, міцність якого вдвічі нижче, ніж сплаву СП15. Тому сплав СП15 є дуже ефективним і для хімічного машинобудування.

Для потреб авіаційної промисловості України в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблено високоміцний титановий сплав Т110 ($\text{Ti-5Al-1Mo-1V-4Nb-2Fe-0,5Zr}$), який має межу міцності не менш як 1100 МПа і за своїми механічними характеристиками, в тому числі втомними, перевищує показники одного з найкращих радянських титанових сплавів авіаційного призначення ВТ22 ($\text{Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr}$). На листи зі сплаву Т110 оформлено технічні умови України ТУУ 27.4.05416923.071. Цей сплав використовують на практиці для бронезахисних елементів у конструкціях літальних апаратів.

Серед останніх розробок Інституту слід відзначити новий високоміцний двофазний ($\alpha+\beta$)-титановий сплав на основі восьмикомпонентної системи легування $\text{Ti-5Al-3Mo-2V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr}$ (умовна марка Т120) з межею міцності не меншою за 1200 МПа та відносним подовженням не менш як 12 %. На цей сплав у 2016 р. отримано патент України.

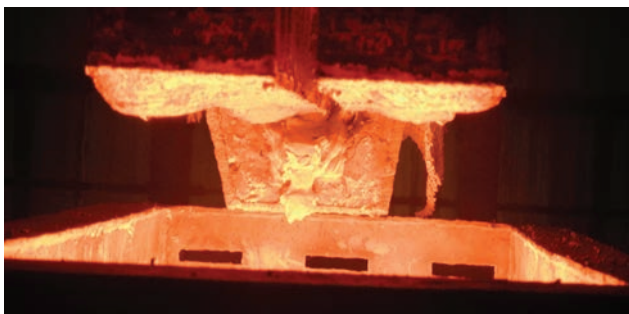
Для виробництва титанових сплавів в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблено технологію електронно-променевої плавки з проміжною ємністю (ЕПП). Технологія ЕПП забезпечує гарантоване видалення тугоплавких включень високої і низької густини. Плавка здійснюється у вакуумі 0,1...0,01 Па, що практично виключає додаткове забруднення титану газовими домішками, що дозволяє використовувати в якості вихідної шихти до 100 % брухту і губчастий титан зниженої якості без його попереднього пресування в електрод, що витрачається. Технологія ЕПП також дозволяє виплавляти зливки як круглого, так і квадратного перетинів, а також зливки-сляби.



Електронно-променева установка для виплавки титанових зливок діаметром до 1100 мм та масою до 20 т



Зливки жароміцного титанового сплаву ВТ3-1 діаметром 840 мм та довжиною 3000 мм



Плавлення витратних електродів при виплавці листового зливка ЕШП

ненайкращі часи свого життя, Інститут вражає обладнанням своїх лабораторій та дослідно-промислових виробництв, в нашому випадку — наявністю металургійних печей для отримання багатотонних зливок сталей та сплавів різних металів.

Найвідомішим успіхом металургійної діяльності Інституту стало створення нових переплавних процесів спеціальної електрометалургії та проведення всебічних досліджень цих процесів, якості переплавленого металу, створення відповідного обладнання та впровадження цих розробок в промисловість, або ж, як тепер кажуть, інноваційна діяльність. Почалось все ще за життя Євгена Оскаровича, коли відкриття явища проходження електричного струму через розплавлений шлак, що не є провідником електричного струму в твердому стані, стало основою для створення не тільки нового способу зварювання — електрошлакового, але й нового способу плавлення металів — електрошлакового переплаву (ЕШП). Перший в світі зливок ЕШП було отримано в лабораторії Інституту ще у 1952 р. Зазначимо також, що приблизно через 15 років в Інституті було розроблено ще один процес спеціальної плавки металів — це плазово-дуговий переплав (ПДП). Тобто, з чотирьох основних переплавних процесів спеціальної електрометалургії (вакуумно-дугового, електрошлакового, плазово-дугового та електронно-променевого) половину створено саме в Патонівському інституті. Сьогодні ми продовжуємо дослідження цих процесів, створюємо нові системи автоматичного керування плавленням та твердінням зливок. Більш того, вперше в Україні налагоджене серійне виробництво титанових зливок



ЕШП листового зливка

В даний час головні авіабудівні фірми США використовують електронно-променевий титан для деталей відповідального призначення тільки після переплаву з проміжною ємністю.

Особливо відзначимо, що ці сплави пройшли весь шлях від винаходу і лабораторних випробувань до промислового виробництва в самому Інституті. Підкреслюємо це тому, що поширена сьогодні на всіх континентах структура наукових центрів, що об'єднує наукові лабораторії, конструкторів та виробництво, вперше в світі була реалізована саме Євгеном Оскаровичем Патonom. Навіть сьогодні, в

електронно-променевим переплавом, в тому числі безпосередньо з кричного блоку титанової губки. Особливу увагу дослідники приділяють і пошуку шляхів використання адитивної природи поступового плавлення та пошарового твердіння при переплавних процесах. Останнім часом в орбіту наших інтересів і досліджень увійшов і вакуумно-дуговий переплав.

Саме поєднання досліджень процесів зварювання та металургійних переплавних процесів отримання сталей та сплавів найвищого гатунку дозволяло й дозволяє нині патонівцям утримуватись на вістрі науково-технічного прогресу.

Автори сподіваються, що їм вдалось окреслити ті риси Євгена Оскаровича Патона, які зумовили появу наукового центру принципово нового типу з поєднанням наукових лабораторій, конструкторів обладнання та дослідного виробництва. Саме такий симбіоз дозволяє мінімізувати час між дослідженнями в лабораторіях вчених та реалізацією нових знань виробництвом найскладнішої техніки й матеріалів, згуртовує воедино науку і інновації.

Огляд діяльності Патонівського інституту безумовно потребує доповнення розповіддю про вплив Бориса Євгеновича Патона на його металургійну складову, про деталі якого не завжди можна про-

читати в його книгах та статтях. Зокрема про те, що саме він був ініціатором розвитку в Інституті не тільки електронно-променевого зварювання, а й переплаву. Безумовно, що визначну роль тут відіграла його унікальна наукова та інженерна інтуїція, яка була притаманна й Євгену Оскаровичу. Більш того, впродовж значного часу саме Борис Євгенович був, так би мовити, позаштатним радником керівників країни з питань металургії. Йому повинні бути вдячні Молдова та Білорусь, бо саме Б.Є. Патон ще за часів СРСР став ініціатором створення в цих країнах міні-металургійних заводів, які відіграють значну роль в економіці обох країн.

Підсумовуючи основні металургійні напрями досліджень та розробок Інституту, їх можна поділити на чотири складові:

- розробка нових металевих матеріалів та технологій їх виробництва від плавки до термічної обробки;
- дослідження металургійних явищ плавлення, рафінування та тверднення металів і сплавів, в тому числі в переплавних процесах та при формуванні зливків;
- розробка відповідного обладнання та ефективних технологій;
- прогностичні дослідження розвитку металургії.

Оскільки Патонівська школа передбачає націленість на нове, спробуємо окреслити перспективи по кожному з чотирьох напрямів. Безумовно, буде розширене використання найновіших комп'ютерних методів створення нових металевих матеріалів та аналізу фізико-хімічних процесів при їх виплавці та рафінуванні й продовжено вдосконалення власних математичних моделей процесів кристалізації. Нагальною задачею є також опанування деяких типів сталей та сплавів, що в силу численних причин вже широко застосовують в світі, але, на жаль, залишились поза колом наукового пошуку в Україні. Мова йде перш за все про інтерметаліди титану та заліза й так звані «суперсплави» на нікелевій основі типу Inconel для сучасних парових та газових турбін з супер надкритичними параметрами. Окрім цього потребують досконалого вивчення сталі японських металургів з торговою маркою HTUFF®. Завдяки особливостям мікролегуювання оксидами магнію ці сталі є стійкими до перегріву в зоні термічного впливу при зварюванні, що дозволило повернути в будівництво електрошлакове зварювання, оскільки зварні з'єднання таких сталей не потребують термічної обробки. Додамо до цього переліку ще й високоміцні надлегкі сталі з комплексним легуванням марганцем і алюмінієм, що мають питому вагу менше 7 т/м³.

В дослідженнях металургії переплавних процесів нагальним завданням є розширення існуючих математичних моделей для прогнозування ліквідаційних процесів при кристалізації високолегованих сталей і сплавів та утворення тих чи інших типів фаз в них. Такі моделі мають бути залучені до систем автоматичного керування переплавними процесами, що дозволить підняти рівень якості готових металів та сплавів. На найближчий час це видається головним в розробці нового обладнання й нових технологій.

Останній напрямок потребує сьогодні особливої уваги. На думку авторів в сучасних умовах так званої циркулярної економіки процеси спеціальної електрометалургії можуть й мають відіграти суттєву роль на шляху створення мікрометалургійних виробництв з річним обсягом випуску металу до 50 000 т шляхом переплаву відпрацьованих деталей з високолегованих сталей та сплавів для повернення їх в обіг з мінімальними втратами. Вважаємо, що саме ЕШП та холодноподові переплави, тобто ЕПП та ПДП, будуть затребувані для рециклінгу високолегованих сталей та сплавів. Слід акцентувати також, що переплавні процеси є вільною від CO₂ металургією.

Таким чином, вчені Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона ведуть дослідження для вирішення двох типів наукових й інженерних проблем сучасної спеціальної металургії — свого роду традиційних, які ми в більших, чи менших деталях окреслили, а також займаються перспективними напрямками, що пов'язані з народженням на наших очах металургії майбутнього. В металургії переплавних процесів ми очікуємо появу промислових гібридних технологій, що поєднують відомі позитивні результати дугового й шлакового плавлення, а також ведення таких процесів у вакуумі. Видається також перспективним поєднання нагріву променем чи плазмою, характерних для холодноподових переплавів, із залученням додаткових джерел, наприклад, індукційного нагріву. Певні, ми є свідками радикальної трансформації металургії з реальним переходом від традиційного доменного процесу до водневого відновлення з компактними модулями виплавки, розливки й прокатки по типу ESP (endless strip production — безкінечне виробництво листового металу). В тісній творчій співпраці зі зварювальниками й матеріалознавцями Патонівська металургія має гарне майбутнє, безліч завдань й широке поле наукового й інженерного пошуку.

Ф.К. БІКТАГІРОВУ — 70!



22 лютого 2020 р. виповнилося 70 років провідному науковому співробітнику відділу плазмово-шлакової металургії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, фахівцю в галузі спеціальної електрометалургії, зокрема електрошлакових технологій, доктору технічних наук Фаріту Каміловичу Биктагірову.

Народився Фаріт Камілович в Магнітогорську — місті металургів, що і визначило його професійну направленість. У 1972 р. він успішно закінчив Магнітогорський гірничо-металургійний інститут за спеціальністю «Металознавство, устаткування та технологія термічної обробки металів» і був направлений на роботу в Волгоградський науково-дослідний інститут технології машинобудування (ВНДІТМаш), де займався розробкою та впровадженням у виробництво новітніх технологій термічної та хіміко-термічної обробки металів, а саме — цементації та нітроцементації з газової фази, що значно підвищувало якість металевих виробів та продуктивність у порівнянні з діючими на той час твердофазними процесами поверхневого зміцнення.

Отримавши початковий досвід наукової діяльності, Ф.К. Биктагіров у 1975 р. вступив до аспірантури при ІЕЗ ім. Є.О. Патона, після закінчення якої працює в інституті дотепер. Він спеціалізується в дослідженнях фізико-хімічних процесів у системі газ–шлак–метал та власти-

востей оксидно-фторидних шлаків і їх здатності щодо рафінування, вивчає особливості електрошлакового очищення металів і закономірності формування кристалічної структури та хімічного складу зливків і виливок, розробляє технології та устаткування для електрошлакової обробки металів і сплавів з метою підвищення їх якості, вивчає процеси рідкофазного відновлення та термодинамічні умови їх протікання. У 1982 р. Фаріт Камілович захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата, а в 2008 р. — доктора технічних наук у галузі металургії. Результати його наукової діяльності опубліковані більш ніж у 130-ти наукових працях і винаходах.

На основі виконаних Ф.К. Биктагіровим теоретичних і експериментальних досліджень розроблено та удосконалено різні технології та процеси, в тому числі: електрошлакового та порційного електрошлакового відливання великотоннажних зливків масою до 200 т; електрошлакового рафінування електролітичного марганцю; електрошлакової плавки і переробки некомпактної металеві та неметалевої шихти з отриманням різноманітних металів, феросплавів і лігатур.

В останні роки Ф.К. Биктагіровим проводяться дослідження енергетичних та фізико-хімічних закономірностей при електрошлаковому процесі з невитратними електродами з метою удосконалення відомих і розробки нових методів нагрівання, плавки та обробки металів і металовмісних матеріалів та підвищення якості великотоннажних ковальських і листових зливків. Його знання та досвід дуже важливі при підготовці нових науковців і Фаріт Камілович щиро ділиться ними. Він є членом спеціалізованих учених рад ІЕЗ ім. Є.О. Патона та ФТМС НАН України щодо захисту кандидатських та докторських дисертацій в металургійному напрямку.

Щиро вітаємо Вас, Фаріте Каміловичу, з ювілеєм, бажаємо міцного здоров'я, щастя, успіхів, натхнення та нових творчих досягнень.



ІНЖЕНЕРНИЙ ЦЕНТР ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

Відділ № 57 «Фізичних процесів, техніки і устаткування для електронно-променевого і лазерного зварювання» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та Інженерний центр електронно-променевого зварювання протягом багатьох десятиліть спеціалізуються на розробці технологій електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) багатьох сучасних конструкційних сплавів, а також на розробці обладнання для ЕПЗ і споріднених технологічних процесів для авіакосмічної промисловості, енергетичного та хімічного машинобудування, приладобудування та медицини.

Основні напрямки діяльності:

- розробка технології та технологічних прийомів ЕПЗ матеріалів і виробів з товщиною зварювальних кромок від 0,5 до 250 мм;
- дослідження фізичних процесів у зварювальній ванні при з'єднанні різних металів та сплавів товщиною до 250 мм;
- розробка ремонтних технологій вузлів авіаційних двигунів та газових турбін;
- розробка адитивних технологій виготовлення виробів заданої форми методами пошарового електронно-променевого наплавлення у вакуумі із застосуванням порошкових матеріалів (EBM – Electron Beam Melting) та присадного дроту (DM – Direct Manufacturing), що виготовляються в Україні;
- розробка та виготовлення обладнання для реалізації адитивних технологій в промисловості;

– вдосконалення зварювальних гармат і джерел живлення для ЕПЗ;

– розробка програмного забезпечення з управління установками для ЕПЗ;

– розробка, виготовлення, введення в експлуатацію, гарантійне та післягарантійне технічне обслуговування електронно-променевого обладнання відповідно до специфікацій замовника та цільовим призначенням продукції на території України, Європи, Америки та Азії;

– використання власних виробничих потужностей для виготовлення дослідних партій деталей і вузлів, для яких застосування ЕПЗ є оптимальним рішенням.

Нове покоління електронно-променевих установок, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона на основі модельно-орієнтованого управління, освоєно в останні роки на двадцяти підприємствах авіакосмічної та енергетичної промисловості, а також підприємств машинобудування США, Китаю, Південної Кореї та Індії.

Всі розроблені та поставлені відділом установки можна розділити на декілька типів за об'ємом зварювальної камери: «малі», «середні», «великі» та «надвеликі». При цьому характерною рисою установок, розроблених для ЕПЗ великогабаритних деталей, є внутрішньокамерна мобільна електронно-променева гармата, що має від 3 до 5 ступенів свободи та точність позиціонування не гірше 0,08 мм. Це, безумовно, дозволяє макси-



Загальний вигляд виробничого майданчика



Малогабаритна електронно-променева установка

мально підвищити коефіцієнт використання внутрішнього об'єму вакуумної камери.

Наявність виробничого приміщення площею 2000 м², оснащеного порталним краном вантажопідйомністю 5/30 т дозволяє здійснювати складання та налагодження установок для ЕПЗ з об'ємом вакуумних камер до 100 м³. Якщо габарити або маса вакуумної камери виходять за допустимі для транспортування межі, то вона розділяється на секції з відповідними з'єднувальними фланцями. Застосування коробчастої конструкції стінок і дверей, замість звичайної таврової, забезпечує за тієї ж товщини у два рази більший момент інерції і, як наслідок, менший прогин стінки при відкачуванні камери. Це, в свою чергу, підвищує точність механізму переміщення зварювальної гармати.

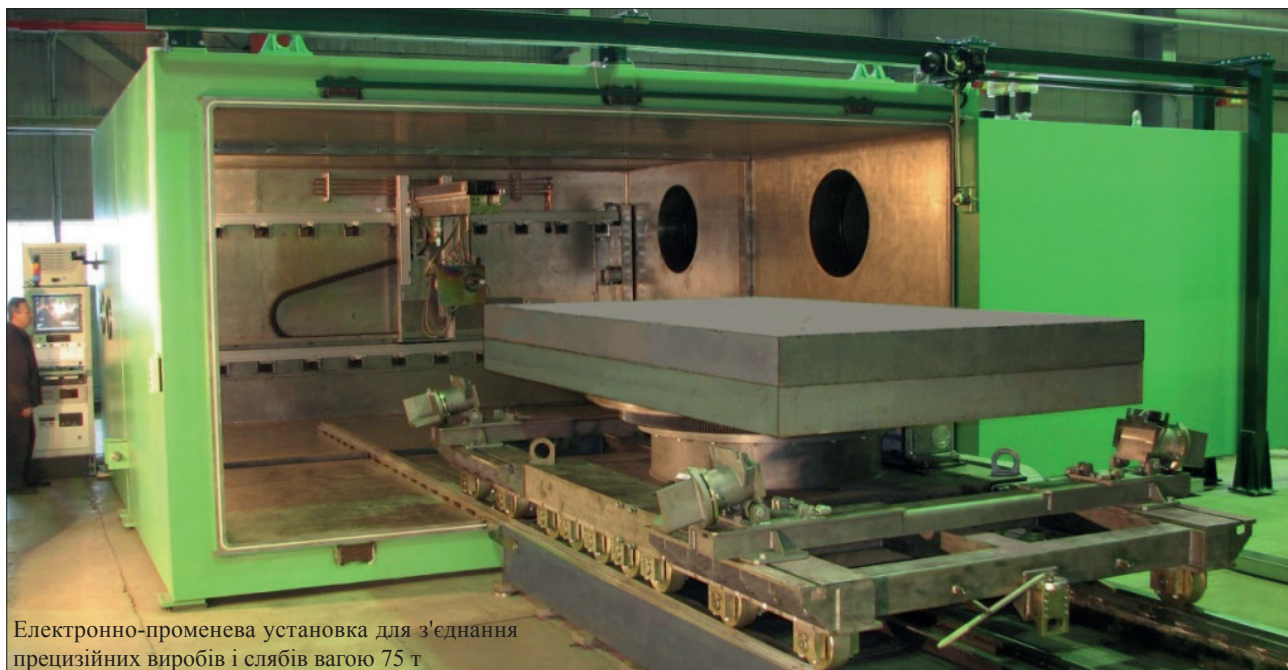
Для управління електронно-променевими установками розроблені та успішно застосовуються розподілені комп'ютерні системи, для зв'язку елементів яких використовуються промислові інтерфейсні шини. Для спостереження та стеження за стиком, що зварюється у реальному режимі часу в установках успішно застосовуються вторинно-

емісійні електронні системи RASTR. Енергетичні комплекси електронно-променевих установок мають високовольтні джерела живлення та зварювальні гармати потужністю до 120 кВт при прискореній напрузі 60...120 кВ.

Поряд з типовою номенклатурою установок під конкретні завдання Замовника, а саме, розміри та форма вузлів, що зварюються, тип і розміщення зварних з'єднань у вузлі, ІЕЗ розробляє та виготовляє безліч варіацій розмірів зварювальних камер, конфігурацій вакуумної системи, механізму переміщення електронно-променевої гармати та деталі, що зварюється. Більш того, крім самого обладнання, розробляється і технологія зварювання конструкцій, тобто Замовник придбає обладнання разом із технологією ЕПЗ конкретних деталей.

До 2020 р. вже розроблено та поставлено понад 150 комплектів електронно-променевого обладнання в різні країни світу. Нашими замовниками та партнерами є: Airbus Industry (France), Boeing (USA), British Aerospace (United Kingdom), Hitachi Works (Japan), MHI (Japan), GKN (USA), Halla Industrial Co. (South Korea), BIAM (China), The Harbin Institute of Technology (China), Doosan Heavy Industries & Constructions Co. (South Korea), Harbin Boiler Plant (China), ДП НВКГ «Зоря» – «Машпроект», ДП ЛРЗ «Мотор», ДК «Укроборонпром», АТ «Мотор Січ», ПАТ «Полтавський машинобудівний завод», ДП «ВО ПМЗ ім. О.М. Макарова», ДП завод «Генератор» та інші.

Використовуючи науковий потенціал вчених Національної академії наук України, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України постійно вдосконалює устаткування та електронно-променеві технології відповідно до реальних замовлень промисловості.



Електронно-променева установка для з'єднання прецизійних виробів і слябів вагою 75 т



НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР «ТИТАН» ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ

Державне підприємство «Науково-виробничий центр «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» було створено у 1996 р. згідно з рішенням директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України академіка Бориса Євгеновича Патона для дослідно-промислового відпрацювання технологій та обладнання в області електронно-променевої плавки металів і сплавів та їх подальшого впровадження на підприємствах України, а також з метою інтенсифікації науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт в галузі металургії титану на умовах самофінансування.

На виробничих потужностях ДП «НВЦ «Титан» знаходяться в експлуатації шість електронно-променевих установок, в тому числі: три електронно-променеві установки продуктивністю 500 т на рік кожна; спеціалізована електронно-променева установка продуктивністю 1500 т на рік; електронно-променева установка для оплавлення поверхні злитків як круглого, так і прямокутного перетинів; лабораторна електронно-променева установка для створення нових сплавів на основі заліза, нікелю, титану та інших металів, а також відпрацювання технологій їх отримання.

Установки оснащені аксіальними електронно-променевими гарматами «Патон-300» номінальною потужністю 300 кВт, які мають диференціальне відкачування, що дозволяє вести процес плавки в стійкому безперебійному режимі.

Для отримання злитків сплавів титану, в якості вихідної шихти можуть бути використані: титанова губка (брикетована, розсипна, нероздроблені блоки), титановий лом, легуючі компоненти у вигляді лігатур.

На ДП «НВЦ «Титан» впроваджено технологію електронно-променевої плавки високоякісних злитків титанових сплавів, які містять включення низької та високої щільності, з гарантованим хімічним складом.

Для скорочення втрат металу замість механічної обробки на ДП «НВЦ «Титан» застосовується технологія оплавлення бічної поверхні злитків як круглого, так і прямокутного перетинів. Застосування технології електронно-променевого оплавлення бічної поверхні злитків дозволяє видаляти поверхневі дефекти без механічної обробки поверхні злитків, що збільшує вихід придатного металу до 15 % в залежності від маси зливка.

Кожен зливочок піддається візуальному та ультразвуковому контролю якості.



Електронно-променева установка YE5812



Універсальна електронно-променева установка YE5810



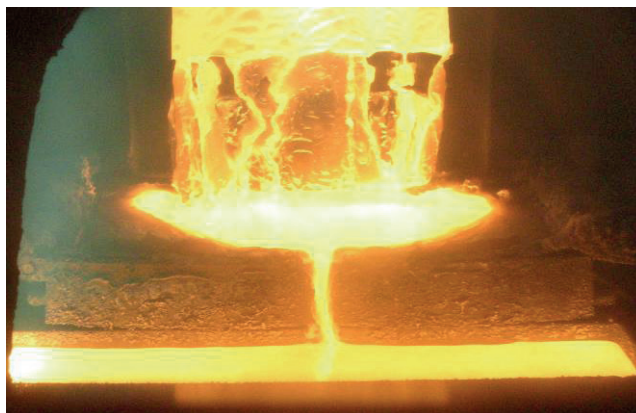
Електронно-променева установка YE121



Електронно-променеві гармати «Патон-300»



Переплав брикетів губчастого титану в зливков діаметром 400 мм Grade 2



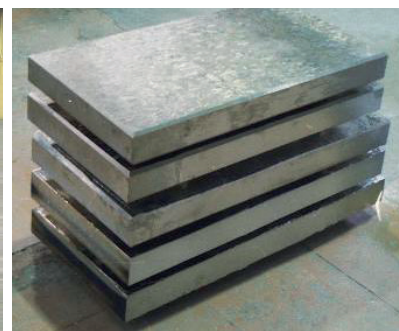
Виплавка зливка-сляба 165×950×2500 мм титанового сплаву ПТ-3В



Зливки титану діаметром 100...600 мм



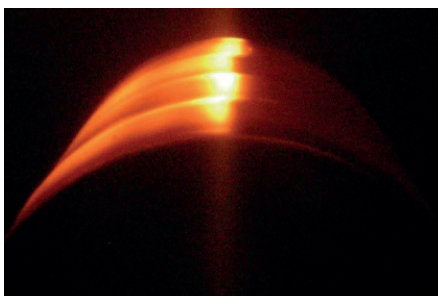
Зливков титану діаметром 1100 мм



Зливки-сляби 165×950×1500 мм з титану



Електронно-променева установка UE185 для оплавлення поверхні зливків



Процес оплавлення зливку титану діаметром 1100 мм



Поверхня зливків титану: оплавлена; механічно оброблена; лита

Сортамент продукції, що виробляється ДП «НВЦ «Титан»

Сортамент	Марки сплавів
165×950×4000 мм; 150×530×4000 мм; діаметром 80, 110, 150, 195, 300, 400, 500, 600, 830, 1100 мм, довжиною до 4000 мм	BT1-0, BT1-00, BT3-1, BT5, BT6, BT8, BT14, BT20, BT22, ПТЗВ, ПТ7М, ПТ1М, 3М, ET3, Grade 1, Grade 2, Grade 5

Хімічний склад зливків відповідає вимогам вітчизняних і зарубіжних стандартів (ДСТУ, ASTM, AMS та ін.).

За погодженням із Замовником можуть виплавлятися інші марки сплавів.

Контактна інформація: 03028, Україна, м. Київ, вул. Ракетна, 26
тел.: (044) 524-95-43, факс: (044) 524-10-96; e-mail: titan.paton@gmail.com





МІЖНАРОДНИЙ ЦЕНТР ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

Технологія електронно-променевого випаровування (атомізації) та подальшого фізичного осадження парової фази у вакуумі (ЕВ-РВД) для отримання товстих плівок та масивних конденсатів із заданими структурою та властивостями почала розроблятися в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона під керівництвом Бориса Олексійовича Мовчана на початку 1960-х років. Створені протягом 1975–1991 рр. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона електронно-променеві технології та обладнання (15 промислових багатокамерних установок) були впроваджені на багатьох підприємствах Міністерств авіаційної, суднобудівної та газової промисловостей для нанесення жаростійких, корозійностійких та термобар'єрних покриттів із зовнішнім керамічним шаром на лопатки газових турбін різноманітного призначення.

Державне госпрозрахункове підприємство «Міжнародний центр електронно-променевих технологій Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» (МЦ ЕПТ) засноване у 1994 р., продовжує систематичні наукові дослідження для створення нових матеріалів та захисних покриттів, які отримуються шляхом використання електронно-променевих технологій. Розроблено наукові основи електронно-променевих технологій отримання аморфних, нанокристалічних, дисперснозміцнених, мікрошарових, пористих та градієнтних матеріалів та покриттів; конкретні технології та нові зразки електронно-променевого обладнання, які отримали міжнародне визнання, захищені численними патентами (США, Європа, КНР), в тому числі спільними патентами із замовниками.

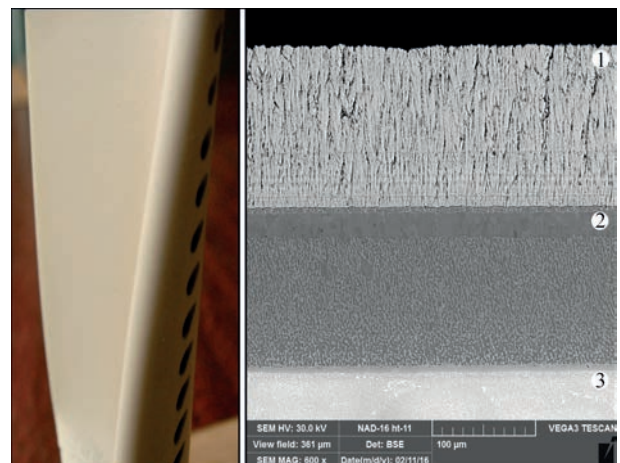
Розроблені у МЦ ЕПТ технології для нанесення градієнтних захисних покриттів забезпечують вищий ступінь повторюваності складу, структури та довговічності порівняно із покриттями, які отримуються за традиційною багатоступінчатою технологією. Наприклад, градієнтні термобар'єрні покриття типу $\text{NiCoCrAlY(AlCr)/YSZ}$ для захисту лопаток газотурбінних двигунів (див. рисунок), з товщиною керамічного шару близько 160 мкм мають низький рівень теплопровідності (близько 1,2 Вт/(м·К), а їхня термоциклічна довговічність у 2...3 рази вища, ніж у традиційних термобар'єрних покриттів.

Створено технологію нанесення багатошарового демпфуючого/ерозійностійкого наноструктурного покриття для захисту деталей із сплавів на основі титану та алюмінію.

Основними замовниками МЦ ЕПТ на виконання науково-дослідних контрактів є закордонні компанії та наукові центри США («General Electric», «Pratt&Whitney», «Honeywell», Пенсільванський університет), Канади, Японії та Індії.

Активне співробітництво встановлено із підприємствами та організаціями Китайської Народної Республіки, при цьому усім замовникам пропонується як обладнання, так і новітні технології. За останні роки в КНР разом із 6 електронно-променевими установками продано 4 ліцензії на право промислового використання патентів для осадження термобар'єрних покриттів, було проведено навчання та підвищення кваліфікації китайських інженерів та техніків.

Слід відмітити, що перша електронно-променева установка, спроектована та виготовлена в кінці 1990-х років в МЦ ЕПТ, була поставлена в Пекін (Beijing University of Aeronautics and Astronautics). Всього в МЦ ЕПТ було спроектовано, виготовлено та поставлено китайським замовникам 13 електронно-променевих установок, які експлуатуються як в науково-дослідних організаціях (Beijing University of Aeronautics and Astronautics,



Зовнішній вигляд та мікроструктура градієнтного термобар'єрного покриття $\text{NiCoCrAlY(AlCr)/ZrO}_2 - 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ на лопатці газотурбінного двигуна:

- 1 – зовнішній керамічний шар $\text{ZrO}_2 - 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$;
- 2 – жаростійкий шар NiCoCrAlY з градієнтною зоною AlCr;
- 3 – жароміцний сплав



Електронно-променеві установки, розроблені та виготовлені в МЦ ЕПТ, працюють в КНР, США, Канаді та Індії

Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing Institute of Aeronautical Materials), так і на промислових підприємствах в містах Сіань, Гуїчжоу, Шеньян, Харбін, Ченгду.

У 2019 р. ліцензію на використання технології високошвидкісного електронно-променевого випаровування корозійностійких сплавів для нанесення захисних покриттів придбало ДП «НВКГ «Зоря»—«Машпроект» (м. Миколаїв), продовжуються спільні дослідження щодо вдосконалення композиційних покриттів типу метал/кераміка, які використовуються на цьому підприємстві.

В МЦ ЕПТ проводяться розробки варіантів гібридних електронно-променевих технологій, які об'єднують фізичні та хімічні процеси осадження неорганічних речовин у вакуумі. Електронно-променева гібридна нанотехнологія та відповідне обладнання є реальною основою для подальшого науково-технічного та економічного прогресу для отримання захисних покриттів в різноманітних галузях сучасного машинобудування.

Останнім часом, одночасно із відміченими вище традиційними технологічними напрямка-

ми, в МЦ ЕПТ отримав розвиток новий напрямок: електронно-променева технологія нанесення наноструктурних покриттів («острівкових» та суцільних) на порошки та гранули різноманітних матеріалів.

Всього за 25 років існування МЦ ЕПТ для закордонних замовників (КНР, США, Канада, Індія) було виготовлено та поставлено 17 електронно-променевих установок різноманітного призначення та продано 6 ліцензій на право промислового використання патентів для нанесення захисних покриттів. Запропоновані замовникам установки нового покоління оснащені сучасними вакуумними комплектуючими західного виробництва, вдосконаленими електронно-променевими прожекторами зі збільшеною до 100 год. довговічністю катоду, стабілізованим високовольтним джерелом живлення, що відповідає європейському стандарту CEI 61000-3-4, сучасними промисловими комп'ютерами для системи управління.

<http://www.paton-icebt.kiev.ua/>



*A potential ad actum
Від мрії до реальності*

ТОВ «ПАТОН ТУРБАЙН ТЕКНОЛОДЖІЗ»

Товариство з обмеженою відповідальністю «Paton Turbine Technologies» (PTT), будучи правонаступником «Pratt & Whitney-Paton» (PWP), у 2018-му році відзначило своє двадцятип'ятиріччя.

На початку 1990-х років одна з найбільших фінансово-промислових груп США United Technologies Corporation (UTC) звернулася з ініціативою до Бориса Євгеновича Патона про створення науково-дослідного центру для подальшого розвитку наукових розробок в області електронно-променевої технології, започаткованих раніше Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона під керівництвом відомих учених — Б.Є. Патона, Б.О. Мовчана, І.С. Малашенка, В.О. Тимашова та ін.

Основна спеціалізація створеного спільного підприємства полягала в удосконаленні та адаптації виробництва теплозахисних покриттів — ТЗП (Thermal Barrier Coating) для світового ринку (рис. 1). Застосування ТЗП є одним зі шляхів поліпшення експлуатаційної довговічності теплонавантажених виробів гарячого тракту турбін і більш ефективної роботи газотурбінних установок (ГТУ). У поєднанні з внутрішнім охолодженням ТЗП забезпечують зниження температури на поверхні базового сплаву, а отже, дозволяють підвищити температуру газу на вході в турбіну, збільшивши при цьому її коефіцієнт корисної дії (ККД), а також сприяють захисту від зовнішнього ерозійного впливу і запобігають деградації металу під впливом зовнішнього газового середовища,

термічних і залишкових напружень. Міжнародний досвід останніх десятиліть, особливо в галузі авіації, підтвердив доцільність застосування електронно-променевого осадження у вакуумі (electron beam-physical vapor deposition - EB-PVD) для отримання теплозахисних керамічних покриттів зі стовпчастою досить щільною структурою сформованих кристалітів. Саме така особливість структури забезпечує запас довговічності керамічних покриттів при змінних термоциклічних навантаженнях в процесі експлуатації (рис. 2).

Процес формування електронно-променевих теплозахисних покриттів на жаростійкому зв'язуючому прошарку опанували в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Подальший успішний розвиток технології позначився на формуванні регулярного термічно вирошеного оксидного шару (TGO) на межі з металевим прошарком у процесі осадження кераміки — це було розроблено, впроваджено та сертифіковано завдяки зусиллям українських та американських фахівців «Pratt & Whitney-Paton».

Спільне українсько-американське підприємство «Pratt & Whitney-Paton» на початку своєї діяльності увійшло у виробничу та інтелектуальну кооперацію з компанією «Pratt & Whitney», яка разом з британською компанією «Rolls-Royce» і американською «General Electric» належить до «великої трійки» виробників авіадвигунів.

Вже через рік після заснування компанії в Києві почалося виробництво високотехнологічного електронно-променевого устаткування для амери-



Рис. 1. Загальний вигляд виробничих площин компанії: а — цех нанесення покриттів; б — цех ремонту компонентів газотурбінних двигунів

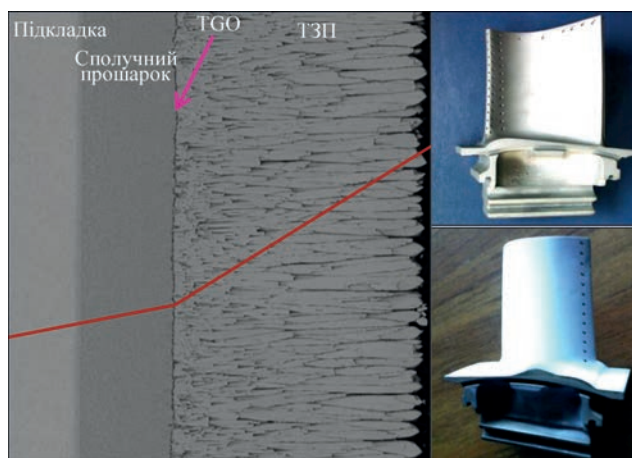


Рис. 2. Теплозахисне покриття та вид робочих лопаток із металевим та керамічними покриттями

канських партнерів, яке поетапно розміщувалося і модернізувалося в США та Сінгапурі.

У 1998 р. на лопатки першого ступеня авіаційного двигуна PW 4000, окремі серії яких призначені для Airbus A300-600, Airbus A310-300, Boeing 747-400, вперше нанесли керамічне електронно-променеове покриття в ДЦ «Pratt & Whitney-Paton» у Києві. Зараз в активі підприємства — формування покриттів на компоненти авіаційних двигунів CF-6 виробництва «GE Aviation» для Airbus A300 / 310/330, Boeing 747, Boeing 767; CFM-56 виробництва CFM International (спільне підприємство компанії Safran і американської «General Electric») для Airbus A319 / 320/321 і Boeing 737. За останні тринадцять років покриття було успішно нанесено на більш ніж 280 тис. лопаток і 18 тис. кілець допоміжних силових установок APU 131-9 Honeywell.

Ще одна важлива сторінка в історії розвитку РТТ — тривале співробітництво з підрозділом «Siemens Industrial Turbomachinery AB» (філія Швеції) щодо нанесення теплозахисного покриття на робочі лопатки турбіни SGT 800 (номінальною потужністю 47/53 МВт). За рівнем викидів забруднюючих речовин в атмосферу, при навантаженні 50...100 % вона відзначена експертами як найкраща серед електрогенеруючих турбін середньої потужності. Активна фаза співпраці стартувала в першому кварталі 2006 р., і за цей час електронно-променеві металеві і керамічні покриття були нанесені більш ніж на 60 тис. лопаток турбіни SGT 800 чотирьох різних поколінь. При цьому ефективність виробництва перевищила 99,8 %. І нині на «Paton Turbine Technologies», як лідера в галузі теплозахисних покриттів, розробляються та випробовуються оригінальні покриття на нове покоління монокристалічних робочих лопаток 1-го ступеня модифікованої турбіни SGT 800, яка виходить на ринок цього року.

Нині в РТТ методом електронно-променевого осадження у вакуумі отримують теплоза-

хисні керамічні покриття на різних типах базових сплавів і металевих прошарках. Сьогодні ТЗП наносять на велику номенклатуру робочих і соплових лопаток, виготовлених із жароміцних нікелевих сплавів рівновісної, спрямованої кристалізації і монокристалічних сплавів різних генерацій, наприклад, MAR M-247, CMSX-4, PWA-1484, Rene-5, CM-186LC, IN- 939, ЖС-32 ЖС-36 та ін. Як сполучні застосовуються металеві шари систем MeCrAlY (+ Hf, Si), сформовані методами EB-PVD, високошвидкісним газополум'єним напиленням в кисневмісному середовищі (HVOF), плазмового напилення в низькому вакуумі (LPPS), алюмінідні NiAl і платиноалюмінідні (Pt, Ni) Al покриття (рис. 3).

Крім того, більшість з них отримують зараз у Києві. У стратегії розвитку «Paton Turbine Technologies» відображена цілеспрямована диверсифікація для створення виробничого комплексу, який допомагає отримувати покриття різного виду або їхніх систем — вони використовуються для компонентів гарячого тракту турбін газотурбінних двигунів. Склад та спосіб отримання металевих покриттів обираються залежно від їхніх функціональних особливостей і типу базового сплаву компоненту, на який воно наноситься. Важливо відзначити, що випробування на термоциклічну довговічність зразків з покриттями показали, що деякі системи теплозахисних покриттів забезпечують довговічність понад 3700 термоциклів при максимальній температурі 1100 °С.

Наше підприємство переживало періоди піднесення та спаду, і досить серйозним випробуванням був 2014 р., коли американські партнери залишили дослідницький центр «Pratt & Whitney-Paton» і на його базі був організований правонаступник — ТОВ «Paton Turbine Technologies». Завдяки підтримці ІЕЗ ім. Є.О. Патона та особисто керівництва інституту, а також максимальній зацікавленості у розвитку «Paton Turbine Technologies» нового учасника РТТ, підприємство отримало імпульс для подальшого розвитку, виходу на нові горизонти — як промислового виробництва, так і опанування передових технологій.

Нині завдяки знанням, творчому підходу та належній організації виробництва електронно-променевої установки, виготовлені на Paton Turbine Technologies/ Pratt&Whitney-Paton, продовжують успішно працювати над замовленнями авіаційної промисловості в США та Сінгапурі. Продовжує розвиватися міжнародна співпраця з компаніями «Siemens Industrial Turbomachinery AB», «Honeywell», «Meyer Tool, Inc.», «Kawasaki Heavy Industries, Ltd.» Для міжнародного позиціонування компанії важливо відзначити, що РТТ включений у базу даних компанії Siemens Industrial

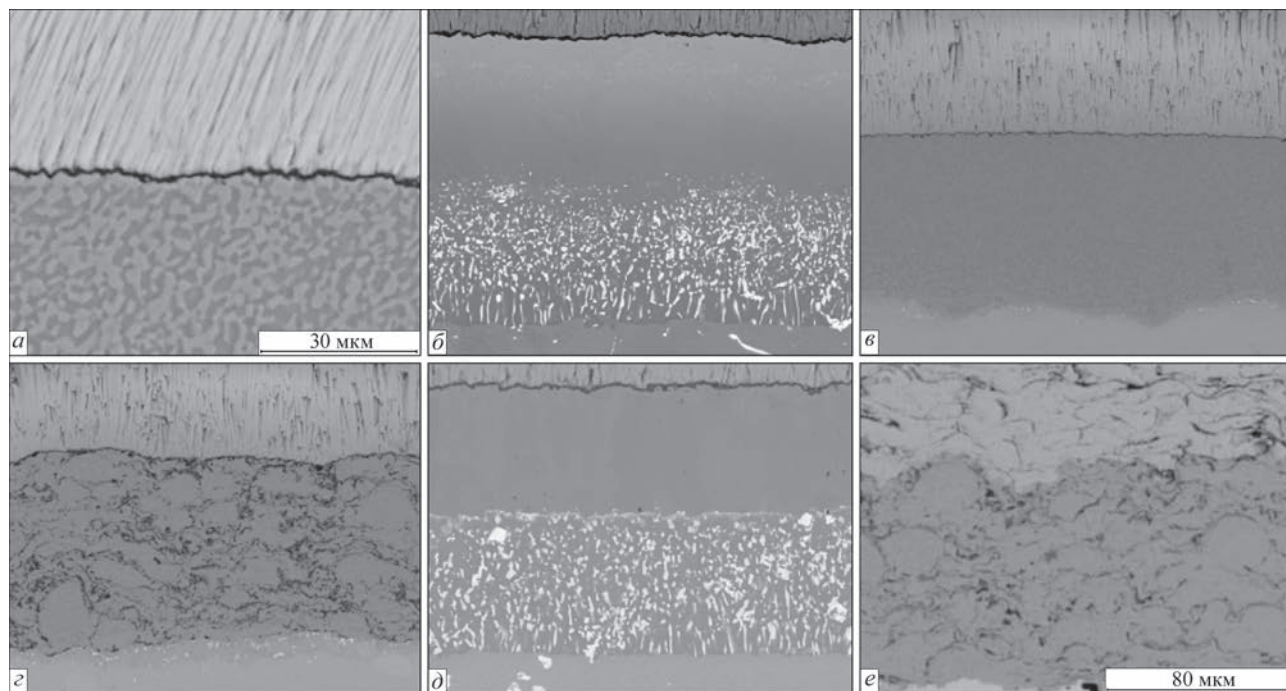


Рис. 3. Різні типи сполучних прошарків у теплозахисних системах покриттів, отриманих електронно-променевим осадженням у вакуумі (EB-PVD) (а – д) та плазмовим напыленням на повітрі (APS). а – EB-PVD; б – PtAl; в – LPPS; г, е – HVOF; д – NiAl

Turbomachinery AB як такий, що пройшов кваліфікацію та погоджений для співпраці постачальник (SIT Approval Supplier Data Base (ASD) SQ).

Високий рівень підприємства підтверджено сертифікатами ISO 9001, AS 9100, ISO 14001, FAA (Federal Aviation Administration), NADCAP (National Aerospace and Defence Contractors Accreditation Program), повторне підтвердження яких здійснюється на регулярній основі.

У компанії цілеспрямовано зберігається високий рівень організації виробництва, який був закладений американськими партнерами. У 2009 р. «Pratt & Whitney-Paton» досяг Срібного рівня в системі ACE (Achievement Competitive Excellence) — Досягнення конкурентних переваг в межах United Technologies Corporation, а «Paton Turbine Technologies» продовжує підтримувати роботу усіх ключових елементів системи донині.

Стабільний та впевнений розвиток «Paton Turbine Technologies» позначається і на кадровій політиці компанії. За останні три роки додатково було створено 67 робочих місць (зростання чисельності компанії більш, ніж на 50 % у порівнянні з 2014 р.). При цьому кількість робітників, які мають вищу освіту, складає понад 2/3 від загальної чисельності компанії. Відбулося помітне омолодження трудового колективу.

У процесі розробки технологій електронно-променевих покриттів за двадцятип'ятирічну історію отримано понад 25 різних патентів. При цьому запатентовані технології використовувались та використовуються у реальному виробництві. В «Paton Turbine Technologies» / «Pratt &

Whitney-Paton» була розроблена та зареєстрована власна специфікація як для металевих — PWP-400 (18 типів покриттів), так і для керамічних покриттів — PWP-100.

Разом із розвитком «традиційних» напрямків Науково-технічні підрозділи «Paton Turbine Technologies» продовжують дослідження у галузі розробки принципово нових типів захисних покриттів. В активі — нові види «advanced MCrAlY», отримані шляхом електронно-променевого випаровування сплаву покриттів з додаванням додаткових легуючих елементів. Розвиток керамічних покриттів отримав продовження у застосуванні нових матеріалів на базі сумішей оксидів рідкоземельних металів. Такі матеріали мають теплопровідність нижче стандартної кераміки $ZrO_2-Y_2O_3$. Застосування електронно-променевого випаровування таких матеріалів дозволяє отримувати керамічні покриття нового покоління, що і реалізується в РТТ.

Орієнтуючись на реалії ринку захисних покриттів для авіаційних двигунів та індустріальних газових турбін разом з електронно-променевими зразка MeCrAlY у компанії почали активно розробляти та застосовувати інші методи нанесення захисних покриттів. Як металевий зв'язувальний прошарок для робочих лопаток першого ступеня ГТД широко використовують платиноалюмінідні покриття, які є окремою групою алюмінідних покриттів, модифікованих платиною.

В активі нашої компанії уже є теплозахисні покриття, нанесені на платиноалюмінідні покриття замовників для робочих лопаток авіаційних двигунів, довговічність яких перевищила 1000 термо-

циклів. З 2018 р. в компанії створена і функціонує ділянка електролітичного осадження платини, яка укомплектована конкурентоспроможним українським обладнанням. Цього року завершиться створення лабораторної та введення в експлуатацію виробничої ділянки газозварного алітування на базі модернізованого у Нідерландах наявного обладнання. Це розширить виробничу лінійку РТТ щодо отримання алюмінідних та платиноалюмінідних покриттів для закордонних та українських партнерів. Важливо, що результатом тривалого вивчення властивостей та особливостей формування платиноалюмінідів став розроблений в «Paton Turbine Technologies» оптимальний склад покриття, що як зв'язувальний шар забезпечує формування надійних теплозахисних систем з достатнім сервісним ресурсом як на сплавах рівновісної кристалізації, так і на монокристалічних сплавах різноманітних генерацій (рис.4).

Як альтернативні і більш дешеві методи нанесення покриттів у промисловому комплексі «Paton Turbine Technologies» були розроблені та впроваджені покриття, отримані методами HVOF та APS (air plasma spray) — плазмового розпилення у повітрі. Процеси газотермічного напилення широко застосовуються для нанесення теплозахисних покриттів та зв'язувальних шарів для компонентів двигунів та наземних газових турбін. Ці технології осадження популярні з економічної точки зору, а також завдяки простоті й повторюваності процесу. HVOF-процес дозволяє формувати досить щільні покриття системи NiCoCrAlY (+Hf, Si) (з пористістю менше 2 об.%), які завдяки особливостям ламельної будови та легуючого комплексу демонструють хороший супротив високотемпературному окисленню і термічну стабільність, що дозволяє застосовувати ці покриття як самостійні захисні покриття, а також як зв'язуючі прошарки для теплозахисних покриттів, нанесених методом APS (рис. 5). APS-покриття, які отримують у повітряній або захисній атмосфері, з економічної

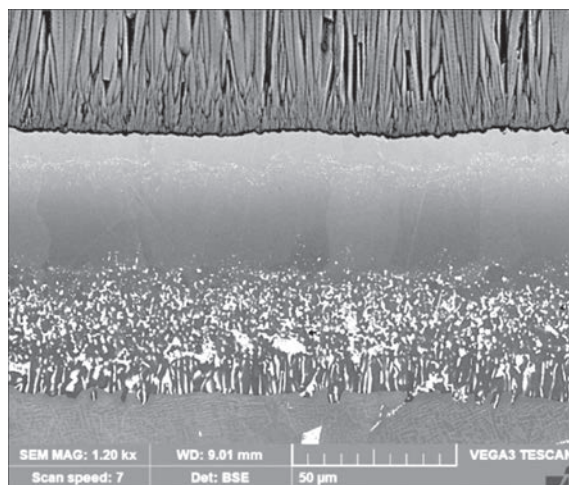


Рис. 4. Структура платино-алюмінідного покриття, сформованого як сполучний прошарок у системі теплозахисного покриття, нанесеного методом EB-PVD

точки зору вигідніші в комерційному застосуванні для компонентів індустриальних та енергетичних турбін і забезпечують довговічність понад 1000 термоциклів. Нанесені цим методом ТЗП мають низьку теплопровідність.

Із застосуванням установки APS також був розроблений метод отримання керамічних покриттів, що притираються, системи ReSZ: вони використовуються в проточній частині турбіни для мінімізації радіального проміжку над робочими лопатками для зменшення втрат газу та підвищення ефективності турбіни. Ці покриття мають достатню ерозійну й корозійну стійкість, жаростійкість, належну пористість (> 20 %) тощо. У випадку взаємодії лопатки з кожухом покриття захищає лопатку і корпус від серйозних пошкоджень та підвищує ефективність турбіни і зменшує споживання палива.

Варто зауважити, що «Paton Turbine Technologies» здійснює нові розробки, спрямовані на подальший розвиток сучасних технологій, їхню адаптацію у виробництві не лише для аерокосмічної галузі, але й для інших галузей, зокрема транспортного машинобудування, металургії, хімічної промисловості.

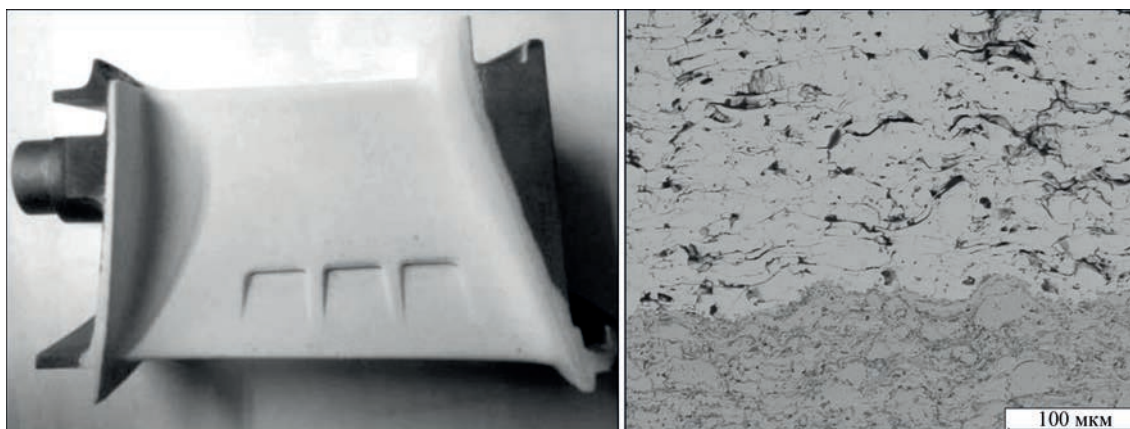


Рис. 5. Лопатка з теплозахисним покриттям, отриманим методами HVOF/APS та структура міжфазної межі металевого (HVOF) та керамічного (APS) прошарків системи ТЗП

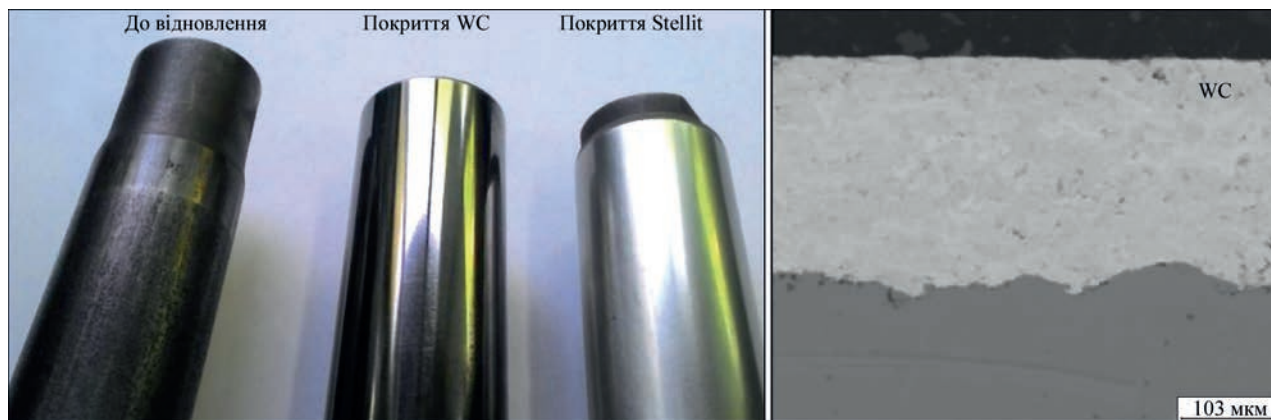


Рис. 6. Загальний вигляд валу після відпрацювання, відновлення з нанесенням зносостійких покриттів типу WC та Stellite та мікроструктура покриття WC

Нині потреба в отриманні зносостійких покриттів на ринку має великий попит у різних заводників. З використанням установки HVOF на РТТ реального застосування набув спосіб газотермічного високошвидкісного отримання зносостійких корозійно стійких та антифрикційних покриттів на зразок WC, Cr_3C_2 , Mo, ПГ-10Н-01 та ін. для виробів обертання і на плоскі поверхні, що стираються (рис. 6).

У 2006 році в «Pratt & Whitney-Paton» почався розвиток нового напрямку, а саме ремонту компонентів газотурбінних двигунів. Нині у виробничому комплексі функціонує окремий цех ремонту, який здійснює комплексний ремонт як серійних партій авіаційних виробів, так і індивідуальних компонентів. Прогресивні способи ремонту лопаток включають зварювання та пайку для продовження робочого ресурсу лопаток турбін та газотурбінних установок загалом. Найбільша увага при відновленні виробів після сервісної експлуатації приділяється високотемпературному паянню у вакуумі. Дифузійне паяння нікелевих жароміцних сплавів зі своїми технологічними можливостями еквівалентне аргонодуговому зварюванню і забезпечує необхідні фізико-механічні властивості з'єднань.

Увесь цикл ремонту включає операції з очищення виробів, зняття відпрацьованих покриттів, механічні й термічні обробки, операції наплавки, паяння, відновлення розмірів та профілю, нанесення покриттів, зміцнення та ін. Основна увага приділяється поєднанню підвищеної міцності та низькотемпературної пластичності ремонтних зон та забезпечення жароміцності базовим сплавам відновлюваних виробів. «Paton Turbine Technologies» здійснює відновлення компонентів авіаційних двигунів РД-33, АЛ-31, Д 30КП, Д 36, ТВ3-117, ДСУ ГТДЕ-117 та індустріальних



Рис. 7. Загальний вигляд соплової лопатки після напрацювання з розгаром на вхідній кромці (а) та після відновлення для подальшої експлуатації (б)

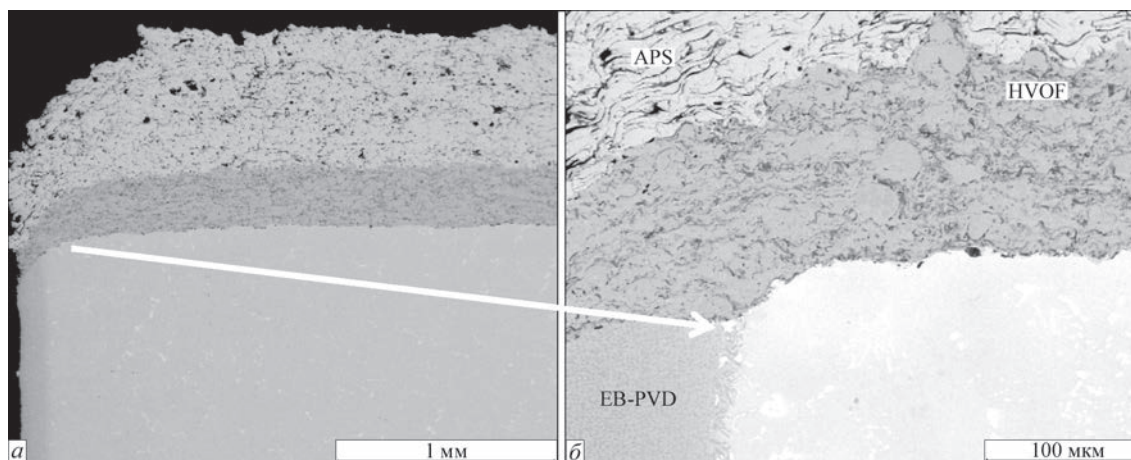


Рис. 8. Поєднання різних типів покриттів на торці пера робочої лопатки енергетичної турбіни; а – фрагмент пера лопатки; б – межа поєднання двох типів захисних та теплозахисного покриттів

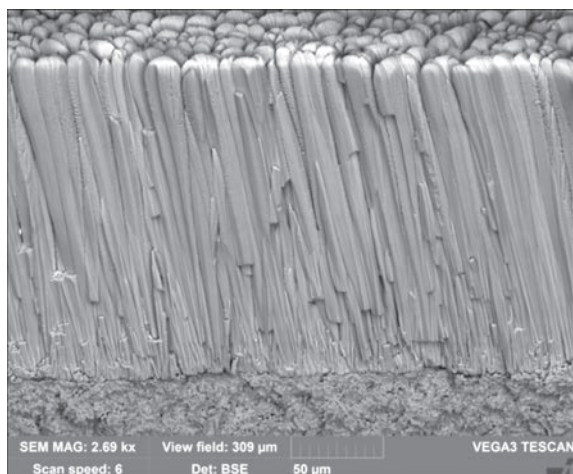


Рис. 9. Класична стовпчата структура теплозахисного покриття, отриманого електронно-променевим осадженням у вакуумі

газотурбінних установок ГТК 10-4, ГТК 10И, MS 3002, ДР-59 та ін.

Для відновлення прогарів, механічних та корозійно-ерозійних ушкоджень, «лікування» тріщин та відновлення розмірів лопаток, сегментів та інших компонентів газотурбінних двигунів нині застосовують багат шарові преформи або композиційні припої, які забезпечують оптимізацію процесів

формування якісних міцних швів з достатніми фізико-механічними характеристиками. Нові опановані технології наплавлення та паяння дозволяють у процесі ремонту відновлювати ливарні та експлуатаційні протяжні розвинені дефекти (тріщини, прогари, оплавлення, деградацію та ін.) компонентів гарячого тракту ГТД (рис. 7).

Маючи знання, навички, досвід та виробничі можливості, нині РТТ здійснює комплексне відновлення компонентів газотурбінних двигунів, які були в експлуатації, та проведення повного циклу ремонту і нанесення різного типу покриттів, які необхідні для цього типу виробів (рис. 8, 9). Цей метод включає експертну оцінку, дефектацію, комплекс термомеханічних операцій, випробування. Таким чином, вимоги замовника задовольняються у форматі «all inclusive», тобто весь процес відновлення в одному місці.

ТОВ «Paton Turbine Technologies» — це приклад вдалої адаптації та запровадження досягнень фундаментальної науки у виробництво, розвитку сучасних технологій, руху до майбутнього з урахуванням актуальних потреб суспільства.

