



# «СУМИ-ЕЛЕКТРОД»

ВПЕРШЕ У НОВІЙ ВАКУУМНІЙ УПАКОВЦІ  
**ЗВАРЮВАЛЬНІ ЕЛЕКТРОДИ**  
для відповідальних конструкцій



ТОВ «СУМИ ЕЛЕКТРОД»  
Україна, 40004, м. Суми, вул. Горького, 58  
Тел./факс: +38 (0542) 22-13-42, 22-54-38, тел.: 22-54-37  
E-mail: [frunze@i.ua](mailto:frunze@i.ua)  
<http://www.frunze.com.ua>



TECHNOLOGY FOR THE WELDER'S WORLD.

# ABI-CAR

## зварювальні трактори ВІД ABICOR BINZEL



ПІІ ТОВ «БІНЦЕЛЬ УКРАЇНА ГМБХ»

Тел.: 0-44/290-9089, 403-1299

Факс: 0-44/403-1399, 403-1499

E-mail: [info@binzel.kiev.ua](mailto:info@binzel.kiev.ua)



[www.binzel-abicor.com](http://www.binzel-abicor.com)

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

03 2020

## Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

## Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

### ЗМІСТ

До 150-річчя від дня народження  
академіка Є.О. Патона ..... 3

#### ЗВАРЮВАННЯ: ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОНСТРУКЦІЇ

Позняков В.Д. Використання сталей класів міцності  
С350–С490 при виготовленні будівельних зварних  
конструкцій ..... 15  
Лобанов Л.М., Махненко О.В., Книш В.В., Соловей С.А.,  
Павловський В.І. Розробка зварної конструкції бічної  
рами візка вантажного вагону підвищеної надійності ..... 22  
Царюк А.К., Левченко Є.В., Гришин М.М., Вавілов А.В.,  
Кантор А.Г., Бивалькевич А.І. Зварювання в енергетичній  
промисловості України ..... 29  
Лабур Т.М. Зварні конструкції з алюмінієвих сплавів ..... 35  
Максимова С.В. Паяння – перспективний метод  
отримання нероз'ємних з'єднань ..... 45

#### НАУКА – ВИРОБНИЦТВО

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  
Дослідний завод зварювального устаткування  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона ..... 65  
Дослідний завод зварювальних матеріалів  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона ..... 67  
Дослідний завод спецелектрометалургії  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона ..... 69  
Дослідне конструкторсько-технологічне бюро  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона ..... 70  
Інженерний центр зварювання тиском  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона ..... 72  
НІЦ «Матеріалообробка вибухом»  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона ..... 74  
Китайсько-український інститут зварювання  
ім. Є.О. Патона ..... 76  
Міжгалузовий учбово-атестаційний центр  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона ..... 79  
Міжнародний науково-технічний центр забезпечення  
якості та сертифікації «ПАТОНСЕРТ» ..... 81  
Атестаційний центр з неруйнівного контролю  
при ІЕЗ ім. Є.О. Патона ..... 83

### CONTENTS

To the 150<sup>th</sup> Anniversary  
of Academician E.O. Paton ..... 3

#### WELDING: TECHNOLOGIES AND CONSTRUCTIONS

Poznyakov V.D. Use of Steels of Strength Class  
C350–C490 in the Production of Building Welded  
Structures ..... 15  
Lobanov L.M., Makhnenko O.V., Knysh V.V., Solovej S.A.,  
Pavlovskiy V.I. Development of Welded Structure of Side  
Frame of Freight Car Truck of Increased Reliability ..... 22  
Tsaryuk A.K., Levchenko E.V., Grishin M.M., Vavilov  
A.V., Kantor A.G., Bivalkevich A.I. Welding in the Power  
Engineering Branch of Ukraine ..... 29  
Labur T.M. Welded Structures from Aluminium Alloys ..... 35  
Maksymova S.V. Brazing as a Promising Method of  
Producing Permanent Joints ..... 45

#### 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  
Pilot Plant of Welding Equipment of E.O. Paton  
Electric Welding Institute ..... 65  
Pilot Plant of Welding Consumables  
of E.O. Paton Electric Welding Institute ..... 67  
Pilot Plant of Special Electrometallurgy of E.O. Paton  
Electric Welding Institute ..... 69  
Experimental Design Technological Office of  
E.O. Paton Electric Welding Institute ..... 70  
Engineering Center of Pressure Welding  
of E.O. Paton Electric Welding Institute ..... 72  
Scientific and Engineering Center of Material Processing  
by Explosion of E.O. Paton Electric Welding Institute ..... 74  
China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding ..... 76  
Paton Electric Welding Institute Training  
and Qualification Center ..... 79  
International Scientific-and-Technical Center on Quality  
Assurance and Certification «PATOCERT» ..... 81  
Attestation Center of Non-Destructive Testing of  
E.O. Paton Electric Welding Institute ..... 83



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну  
в Міжнародному інституті зварювання  
та в Європейській зварювальній федерації  
The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine  
in International Institute of Welding  
and in European Federation for Welding





## Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

### Засновники

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

### Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ  
03150, Україна, Київ-150,  
вул. Казимира Малевича, 11  
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 8277  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as](http://www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as)

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

Рекомендовано до друку  
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну  
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

### Передплата

Передплатний індекс 70031.  
12 випусків на рік (видається щомісячно).  
Друкована версія: 2400 грн. за річний комплект  
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.  
Електронна версія: 2400 грн. за річний комплект  
(випуски журналу надсилаються електронною поштою  
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера  
передплатника надається доступ до архіву журналу).

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается  
англійською мовою під назвою  
«The Paton Welding Journal»:  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj)

За зміст рекламних матеріалів  
редакція журналу відповідальності не несе.

### EDITORIAL BOARD

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

### Founders

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

### Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU  
03150, Ukraine, Kyiv-150,  
11 Kasymyr Malevych Str.  
Tel.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Fax: (38044) 200 8277  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as)

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

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration  
of KV 4788 dated 09.01.2001  
ISSN 0005-111X  
DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

### Subscription

Subscription index 70031.  
12 issues per year (issued monthly), back issues available.  
\$180, subscriptions for the printed (hard copy) version,  
air postage and packaging included.  
\$150, subscriptions for the electronic version  
(sending issues of Journal in pdf format  
or providing access to IP addresses).  
«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)  
journal is republished in English under  
the title «The Paton Welding Journal»:  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj)

The editorial board is not responsible  
for the content of the promotional material.



## До 150-річчя від дня народження академіка Є.О. Патона

*5 березня виповнюється 150 років від дня народження видатного вченого, відомого громадського та державного діяча академіка Євгена Оскаровича Патона.*

*Ім'я Євгена Оскаровича Патона золотими літерами вписане в історію вітчизняної науки, а для м. Києва набуло особливого значення і невіддільне від міста, Київського політехнічного інституту, Національної академії наук України, Інституту електрозварювання. Беззмінний керівник кафедри мостів, яку він створив і очолював протягом 25-ти років, проектувальник київських мостів, засновник кафедри електрозварювання, віце-президент Академії наук УРСР, фундатор і керівник першого в світі наукового інституту електрозварювання Євген Оскарович все своє життя присвятив служінню науці, вихованню та підготовці вчених і фахівців у галузі мостобудування та електрозварювання.*

Євген Оскарович Патон народився 5 березня 1870 р. у м. Ніцца (Франція) в сім'ї російського консула. У 1888 р. закінчив гімназію у м. Бреслау (Німеччина), де крім ґрунтовної підготовки із точних наук досконало вивчив французьку, англійську та німецьку мови.

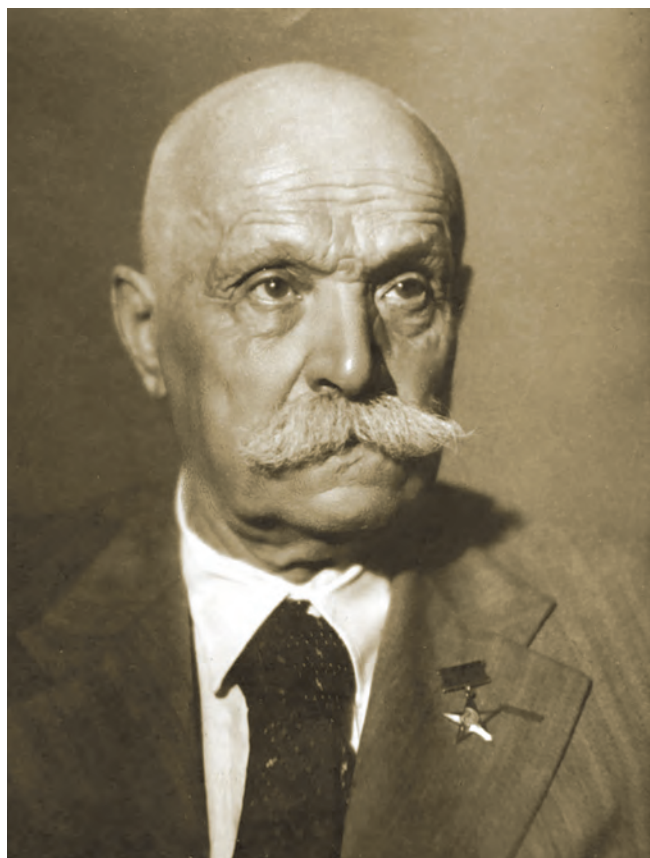
В сім'ї Євгена Оскаровича всіляко розвивали в дітях ініціативу і самостійність. Батько Оскар Петрович вважав, що діти самі повинні вибирати свій життєвий шлях. Згадуючи його з шаною і подякою, Євген Оскарович казав: «Найдорожча спадщина, яку можуть батьки залишити дітям, — це звичка і любов до праці, до професії, обраної на все життя».

Ще навчаючись у гімназії, Євген Оскарович вирішив стати інженером-мостобудівником. У 1888 р. він вступив до Саксонського королівського вищого технічного училища у Дрездені, яке закінчив з відзнакою у 1894 р. По завершенні навчання на інженерно-будівельному факультеті Є.О. Патон отримав запрошення працювати на кафедрі будівельних конструкцій. Одночасно йому запропонували взяти участь у реконструкції Гауптбангофа — головного вокзалу в м. Дрезден. Найбільший мостобудівельний завод «Гутехофнунгсхютте» в Стекрадесне в січні 1895 р. доручив зробити робочий проект шосейного мосту і інші конструкторські роботи для будівництва мостів, що дало йому можливість з перших самостійних кроків на практиці закріпити знання, отримані на студентській лаві.

Понад десять років життя пов'язували Є.О. Патона з Німеччиною, де він здобув фахову освіту та успішно розпочав кар'єру інженера-будівельника, але жити і працювати бажав тільки на батьківщині. Щоб здійснити свою мрію — будувати мости на батьківщині, йому потрібен був російський диплом інженера. У 1895 р. Євген Оскарович вступив до Петербурзького інституту інженерів шляхів сполучення на п'ятий курс. Протягом восьми місяців Є.О. Патон здав екзамени з 12-ти предметів і виконав 5 проектів.

Важко, але впевнено він почав свою дорогу мостобудівника. У травні 1896 р. у Петербурзькому інституті інженерів шляхів сполучення Є.О. Патон блискуче захистив дипломний проект. Новаторську роботу високо оцінив професор Л.Д. Проскуряков — знаний російський мостобудівник та побажав Євгену Оскаровичу удачі. Є.О. Патон був «затверджений у званні інженера шляхів сполучення з правом здійснення проектів і всякого роду будівельних робіт».

Євгену Оскаровичу Патону у Петербурзькому інституті інженерів шляхів сполучення запропонували посаду асистента і одночасно його зарахували до Управління служби дороги Ми-



Академік Є.О. Патон





Шляхопровід на станції Москва Ярославської залізниці за проектом Є.О. Патона, 1897 р.

колаївської залізниці на посаду інженера з розрахунку мостів. Згодом Євген Оскарович перейшов працювати до Управління Московсько-Ярославсько-Архангельської залізниці, де проектував мости та металеві перекриття.

Вже в перші роки інженерної діяльності Євген Оскарович Патон виявив себе талановитим інженером-новатором. Його першою великою самостійною роботою був проект шляхопроводу на станції Москва Ярославської залізниці. У своєму новаторському проекті Є.О. Патон вперше застосував проміжні опори

у вигляді колон з шаровими шарнірами замість громіздких колон прямокутного перерізу без шарнірів, а проїжджу частину запропонував виготовляти з суцільного клепаного хвилястого настилу. Ці ідеї Євгену Оскаровичу прийшлося переконливо захищати перед авторитетними спеціалістами і він зробив для себе висновок на все життя: не відразу нове пробиває собі шлях, його треба наполегливо відстоювати.

У 1897 р. в Москві відкрилося Інженерне училище шляхів сполучення. Його очолив професор Ф.О. Максименко, а заступником з навчальної роботи був призначений професор Л.Д. Проскураков, який запросив Євгена Оскаровича переїхати до Москви і пообіцяв цікаву роботу.

У 1899 р. Євген Оскарович перейшов працювати асистентом і керівником практичних занять з будівельної механіки до Московського інженерного училища, де він успішно поєднав педагогічну, наукову і інженерну діяльність.

Працюючи у Московському інженерному училищі, Є.О. Патон підготував дисертацію «Розрахунок скрізних ферм з жорсткими вузлами». Тема його дисертації народилася із життя, з боротьби передової думки і застарілих уявлень і поглядів щодо мостових ферм. Щоб порівнювати застарілі і нові, ще майже ніким не визнані типи ферм, довелося виконати велику розрахункову роботу. Для цього він побудував інфлюентні лінії. На відміну від прийнятих цей спосіб розрахунку був більш наочним і ясным.

У 1900 р. Євген Оскарович Патон завершив роботу над дисертацією і в літку 1901 р. в актовій залі Петербурзького інституту інженерів шляхів сполучення відбувся її захист. Своєю дисертацією Євген Оскарович завдав нищівного удару дворозкосній системі ферм. Він довів, що ці застарілі неекономічні ферми різко уступають фермам інших систем і з того часу їх перестали застосовувати на залізницях Російської імперії.

Євгену Оскаровичу виповнився 31 рік. Рада Інституту інженерів шляхів сполучення одноголосно присудила йому вчену ступінь ад'юнкта, а у Московському училищі він отримав посаду екстраординарного професора з мостів та керівника з їх проектування.

Московський період життя і діяльності Євгена Оскаровича був дуже плідним. З 1901 по 1904 рр. Є.О. Патон опублікував понад 20 наукових статей і посібників для студентів. Вийшли друком два перші томи широко відомого курсу «Залізні мости», виконано ряд проектів мостів та інших конструкцій, зокрема, проект перекриття зали готелю «Метрополь». Його ім'я, як вченого, фахівця з проектування мостів та інших споруд стало широко відомим.

Працюючи над проектами мостів, Євген Оскарович часто долучав до розробки реальних проектів студентів (випускників). Він вважав, що вміння організувати роботу колективу молодих талановитих і відважних співавторів для їх наставника більш почесна тоді, коли трудніше завдання ставить перед ними. І цим він задово



Євген Оскарович Патон зі студентами Московського інженерного училища — учасниками технічної екскурсії, м. Москва, 1899 р.





Дисертація Є.О. Патона на ступінь ад'юнкта, 1901 р.

передбачив той дух колективної творчості у сфері технічних наук, можливості досягти в них успіху об'єднаними зусиллями багатьох дослідників. Саме завдяки таланту організатора йому вдалося поєднати педагогічну і технічну діяльність, яка полягала у створенні проектів мостів та інших споруд та в нагляді за їх будівництвом. Закономірним визнанням авторитету Євгена Оскаровича Патона, як досвідченого мостобудівника, стало призначення його у травні 1905 р. до Мостобудівної комісії, яка очолювала всю роботу з вимог до розрахунків мостів в Росії.

Тоді ж у 1905 р. починається київський період життя і діяльності Євгена Оскаровича. Професор Є.О. Патон був запрошений до Київського політехнічного інституту, а у 1906 р. обраний деканом інженерно-будівельного факультету.

У Політехнічному інституті Євген Оскарович провів велику роботу з реорганізації навчального процесу, вдосконалення навчальних програм та планів, створення лабораторій. Особливо слід відзначити його плідну роботу зі створення у Політехнічному інституті Інженерного музею, де були зібрані проекти мостів, цінні експонати і документи, фотопортрети видатних вчених та інженерів-мостобудівельників.

Викладацьку діяльність Євген Оскарович успішно поєднував з практичною роботою – проектуванням мостів і супроводом їх будівництва. За період з 1895 по 1918 рр. він розробив 35 проектів металевих мостів. Серед найбільш знаних — Мухранський міст через р. Кура в Тифлісі, шосейні мости через річки Гнилий Тикич, Сож, Рось. Всім добре відомий міст над Петрівською алеєю у Києві — це один з перших розбірних металевих мостів в Україні. Його було відкрито 22 листопада 1910 р. Залізні мости Є.О. Патона відрізнялися своєю конструкцією, вони проектувалися з суцільними фермами, металевою проїзною частиною і консолями від опор на берег. Замість статично невизначених і складних мостових ферм Є.О. Патон застосовував статично визначені мостові ферми з простими решітками прямокутної і розкісної систем.

В цей період Є.О. Патон опублікував велику кількість наукових робіт, в котрих були висвітлені питання проектування, розрахунку і будівництва шляхопроводів з колонами, що рухаються, наскрізних ферм з жорсткими вузлами, безроскісних і двороскісних ферм, залізних мостів з залізобетонною проїжджою частиною, розбірних залізних мостів системи Є.О. Патона, питання розрахунку залізних мостів із наскрізними і суцільними фермами, коливання зв'язків, ослаблення листів заклепками та інше. Він впровадив у практику проектування мостів метод розрахунку за лініями впливу (інфлюєнтними лініями), який застосовується і нині.

Видатними капітальними друкованими роботами Є.О. Патона стали книги: «Дерев'яні мости», «Залізні мости» у чотирьох томах, «Таблиці для розрахунку залізних конструкцій мостів». Ці труди, в котрих гранично ясно викладені усі основні питання конструювання, будівництва і експлуатації мостів, мали велике значення для розвитку вітчизняної теорії і практики мостобудування. Вони й до нині продовжують служити керівництвом для студентів і інженерів при проектуванні мостів.



Арочний міст над Петрівською алеєю у м. Києві, 1910 р.



Мухранський міст через р. Кура в м. Тифліс, побудований у 1908 р. за проектом Є.О. Патона





Розбірний міст системи Є.О. Патона

Початок першої світової війни застав Євгена Оскаровича в Ніцці, де він лікувався і відпочивав після тривалої хвороби. Є.О. Патон повернувся до Києва і продовжив працювати у Політехнічному інституті, де педагогічну роботу поєднував з великою науковою, творчою інженерною і організаційною діяльністю.

У цей період для потреб військового відомства Є.О. Патон проектує мости різних типів, створює конструкцію розбірних мостів, названих «мостами Патона», які широко використовувалися у воєнний час. Одночасно Євген Оскарович розробив нові методи будівництва залізних і дерев'яних мостів, при-

ймав саму активну участь у відбудові зруйнованих. У 1918 р. було видано єдиний у своєму роді посібник «Восстановление мостов» з відновлення зруйнованих мостів різних систем. Згодом у переробленому і доповненому виданні 1924 р. Євген Оскарович узагальнив досвід, накопичений при відбудові мостів після першої світової війни, систематизував розроблені ним способи і прийоми їх відбудови.

У 1925 р. виходить друком капітальна праця Є.О. Патона з складання ескізу залізних мостів із атласом креслень «Железные мосты. Составление эскиза».

Є.О. Патон є автором оригінальних робіт зі створення розбірних мостів, зокрема мостів, призначених для перекриття відносно великих прогонів. Розбірні ферми «системи Патона» вигідно відрізнялися від аналогічних ферм «системи Ейфеля». При великому прогоні (54 м) вони були на 15 % легші і мали у п'ять разів менше додаткових частин. На збирання прогонової будови «системи Патона» вимагалось менше затрат праці і часу.

Євген Оскарович розробив оригінальну систему фермопідйомників для відновлення зруйнованих прогононих будов. Такі фермопідйомники застосовувалися при відновленні мостів після першої і другої світових воєн.

Завдяки великому організаційному таланту Є.О. Патона у 1920 р. у Політехнічному інституті створена станція з випробування мостів для обслуговування залізниць України, яка потім була підпорядкована Технічному комітету Наркомату шляхів. Одночасно з великою практичною роботою з випробування мостів на станції (надалі перейменована у Мостовипробувальне бюро) під керівництвом Є.О. Патона проводять значну науково-дослідну роботу. За час існування бюро (1921–1931 рр.) випробувано до 150 мостів різних систем в Україні, Білорусі, Поволжі та Казахстані.

На мостах, що експлуатувалися, виконані дослідження з вивчення розподілу напружень, що виникають від жорсткості вузлів та впливу температури на головні ферми прогонових будов.

Також Євгеном Оскаровичем разом з учнями були вивчені бокові і вертикальні коливання прогонових будов. Не менш цінними є чисельні, головним чином експериментальні, дослідження з вивчення роботи різних частин прогонових будов. До цього циклу відносяться роботи з вивчення впливу проїжджої частини на зусилля головних ферм, переміщення ферм під час змінного навантаження, деформацій верхнього поясу ферм відкритих мостів, а також багато інших досліджень, що розширили уявлення щодо роботи ферм з решіткою різних систем.

Активний творчий пошук Є.О. Патона, намагання досконало дослідити і вирішити проблеми мостобудування мали подальший розвиток. У 1930 р. під його керівництвом був побудований дослідний міст прогоном 12 м, на якому досконально вивчалися питання щодо величини додаткових напружень від жорсткості вузлів в елементах дворешітчатих ферм і ферм з трикутними решітками, місцевий вигін поясів ферм, робота ферм з жорсткими і шарнірними вузлами, розподіл напружень уздовж елементів ферм. Була також вивчена розвантажуюча дія зв'язків на пояси ферм, з'ясовані дійсні зусилля у діагоналях і розпірках зв'язків. Детально досліджено роботу елементів і вузлів проїжджої частини мосту. Всебічно вивчена також робота поздовжніх балок розрізної і нерозрізної конструкцій, різні способи кріплення поперечних балок до ферм, пересічення поздовжніх балок з поперечними та ін. Результати цих



Урочисте відкриття руху по мосту імені Євгенії Бош, спроектованому Є.О. Патonom, м. Київ, 10 травня 1925 р.

дівраний у 1920 р. Урочисте відкриття руху по київському мосту імені Євгенії Бош відбулося 10 травня 1925 р.

Євген Оскарович зі своїми учнями в конкурсах на проектування мостів багаторазово отримував перші, другі і треті премії. На Міжнародному конкурсі, що був об'явлений Народним комісаріатом шляхів сполучення у 1926 р., проект великого розбірного залізничного мосту прогоном від 30 до 88 м, що був представлений Є.О. Патonom, було удостоєно вищої премії. На Всесоюзному конкурсі 1926 р. Євген Оскарович разом із студентами-дипломантами представив два проекти розбірного мосту. Один з них отримав першу премію, а другий — третю. На Всесоюзному конкурсі у 1927 р. два проекти мосту через Дніпро у м. Дніпропетровськ отримали другу та третю премії. Проект мосту через Оку в м. Горький, розроблений Є.О. Патonom разом з іншими інженерами отримав третю премію.

Шосейні і залізничні мости, збудовані за проектами Євгена Оскаровича, відрізнялися вигідною розбивкою отвору на прогони, простою і ясною у роботі системою решітки ферм. Нерідко в них застосовувався залізобетон (для проїжджої частини мостів) і рухомі проміжні опори. Мости були зручні для монтажу і надійні в експлуатації. Багато конструктивних рішень, вперше застосованих Є.О. Патonom на практиці, стали нині загальноприйнятими.

Близько 35-ти років Євген Оскарович віддав мостобудуванню. Разом з учнями та співробітниками створив проекти 40-ка мостів, опублікував понад 160-ти наукових робіт з різних питань будівництва мостів. Багато його учнів стали відомими вченими та інженерами, керівниками промисловості. Євген Оскарович Патон по праву вважається засновником школи мостобудування в Україні.

За рекомендацією Київського політехнічного інституту 29 червня 1929 р. Євген Оскарович Патон був обраний дійсним членом Всеукраїнської академії наук (ВУАН).

У 1930-ті роки країна стала на шлях індустріалізації, що вимагала нових технологій. На будівельних майданчиках та підприємствах почали сміливо застосовувати зварювання під час виготовлення металоконструкцій цехів, доменних печей, труб і газопроводів, річкових суден, обладнання для шахтного виробництва, паровозо- і вагонобудування та ін. Але низька якість металу шва не давала впевненості в міцності та надійності зварних з'єднань, тому виробничники ставилися до зварювання з обережністю та недовірою.

Будучи активним поборником зварювання Є.О. Патон добре усвідомлював, щоб ставити питання про його широке застосування при виготовленні відповідальних зварних кон-

досліджень відомі мостобудівникам з книги Є.О. Патона «Опытный мост Киевского бюро ЦИС НКПС и результаты его исследований».

Виконані Євгеном Оскаровичем спільно з учнями дослідження на робочих і дослідному мостах мали велике наукове і практичне значення. Вони розширили знання про дійсну роботу прогонових будов, були отримані цінні дані для їх проектування.

Євген Оскарович активно працював над проектами нових мостів. У 1925 р. за його проектом у м. Київ було збудовано шосейний міст через Дніпро з ажурними фермами на місті колишнього ланцюгового мосту, що був пі-



Зварювання. Перші кроки





Дослідження міцності зварних з'єднань

Порівняльні дослідження з випробування зварних і клепаних з'єднань, виконані Євгеном Оskarовичем Патонем і його співробітниками, довели, що зварні з'єднання вузлів та конструкцій не поступаються клепаним, а іноді й перевищують їх у міцності та довговічності. Невеликий колектив одностудійців, що зібрав біля себе Є.О. Патон, лише за перші чотири роки наукової діяльності виконав майже половину всіх виданих в країні наукових робіт в галузі зварювання. Деякі з них були передруковані іноземними журналами, зокрема журналом Американського зварювального товариства.

На початку 1932 р. у ВУАН розгорнулося широке обговорення тематики науково-дослідних робіт, що планувалися до виконання у другій п'ятирічці розвитку народного господарства СРСР.

У статті «Шляхи розвитку електрозварювання у другій п'ятирічці» Євгеном Оskarовичем вперше був проведений техніко-економічний аналіз необхідних обсягів виробництва зварювальної апаратури та визначені перспективи застосування її у промисловості. Наукові, інженерні, виробничі та методичні напрацювання вмотивовано обґрунтували необхідність створення спеціального науково-дослідного інституту, де б комплексно вирішувалися проблеми електрозварювання, пов'язані з переходом промисловості до нового способу виробництва металевих конструкцій.

2 лютого 1933 р. Президія ВУАН прийняла рішення щодо організації Інституту електрозварювання, а 1 січня 1934 р. вийшла відповідна постанова Ради Народних Комісарів УРСР про заснування першого в світі спеціалізованого центру з проведення наукових та інженерних робіт в галузі зварювання. Директором Інституту електрозварювання був призначений Євген Оskarович Патон і залишався на цій посаді до кінця життя.

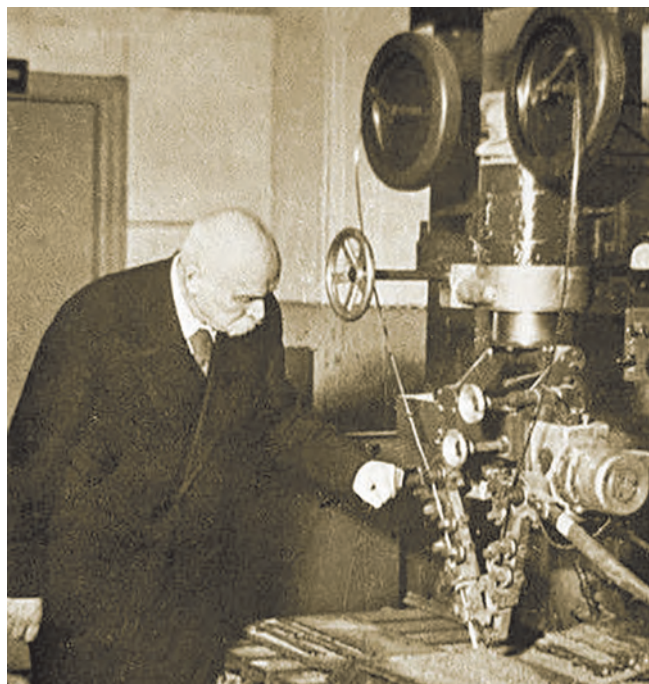
Основним напрямком роботи колективу Інституту електрозварювання в перші роки його існування було дослідження міцності зварних з'єднань і пошук раціональних форм зварних конструкцій. Ці питання мали виключно важливе значення на початку розвитку електрозварювання. Виробничники остерігалися і уникали використання зварювання в конструкціях, що піддаються хоча б незначному динамічному навантаженню, побоювалися зварювальних деформацій і шкідливого впливу напружень, які залишалися в зварних конструкціях. Спільно зі своїми співробітниками Євген Оskarович збагатив зварювальну науку виключно важливими для практики результатами досліджень з міцності зварних з'єднань і конструкцій, що працюють в умовах статичного, вібраційного і ударного навантаження.

За ініціативою Євгена Оskarовича і під його керівництвом були проведені перші комплексні дослідження в галузі металургії зварювання відкритою дугою. До числа найважливіших робіт того часу відносяться дослідження кристалізації зварювальної ванни, причин утворення тріщин в зварних швах, зва-

струкцій, слід побороти недовіру до нової технології, дати їй підґрунтя, а це можливо тільки розробивши наукові та технологічні основи зварювального виробництва. З притаманними йому енергією та цілеспрямованістю Євген Оskarович почав всебічно втілювати свою ідею у життя. У 1929 р. заснував у системі ВУАН у складі кафедри інженерних споруд Електрозварювальну наукову лабораторію, а для сприяння справі впровадження електрозварювання у промислове виробництво у 1930 р. — Електрозварювальний комітет. У м. Київ на заводі «Більшовик» була створена виробнича база.



Автоматичне зварювання цистерни



«У 1939–1940 роках я вже бачив цю важливу проблему, бачив і вірив, що вона цілковито визначить весь зміст нашої наукової роботи у подальшому. Це – автоматичне зварювання під флюсом.» (Є.О. Патон)

У 1936 р. Євген Оskarович з метою ознайомлення широкого кола виробничників з перевагами автоматичного зварювання організував у м. Київ першу Всесоюзну конференцію з питань автоматичного зварювання. За підсумком роботи конференції за наказом Наркомату важкого машинобудування на шести заводах країни було вирішено впровадити технологію автоматичного зварювання. Організаційну і методичну роботу з цього питання покладено на Інститут електрозварювання.

Є.О. Патон був активним прихильником застосування змінного струму у дуговому зварюванні. Він домігся того, що вітчизняні дугові автомати працювали на змінному струмі не гірше закордонних головок зі складними схемами управління, розрахованими на живлення дуги постійним струмом. Життя підтвердило правильність такого рішення. Через кілька років, в період війни, коли наша військова промисловість відчувала гостру необхідність в зварювальних машинах, дугові автомати успішно працювали на змінному струмі.

На початку 1940 р. Є.О. Патон разом із співробітниками було розроблено новий спосіб з'єднання металів — автоматичне дугове зварювання під флюсом. Це відкриття дозволило в багатьох випадках перейти від ручного зварювання до індустріальних, механізованих способів виробництва зварних конструкцій при значному покращенні їх якості. Цей спосіб зварювання мав виключно історичне значення в розвитку зварювального виробництва. Протягом 1940–1941 рр. були розроблені технологія та техніка зварювання, створений перший в світі основний флюс АН-1 та спеціальний електродний дріт, додатково легований кремнієм і марганцем.

Дослідженню автоматичного зварювання під флюсом присвячена робота Євгена Оskarовича «Скоростная автоматическая сварка под слоем флюса», що вийшла трьома виданнями у 1940, 1941, 1942 роках, і є першою в світі монографією в цьому напрямку.

рюваності низьколегованих сталей, процесу плавлення електрода і краплинного переносу металу в зварювальній дузі, взаємодії рідких металу і шлаку.

Розроблена в Інституті електрозварювання під керівництвом Є.О. Патона технологія зварювання відкритою дугою значно перевершила на той час досягнення зарубіжної техніки, та все ж не задовольняла всіх вимог виробництва.

Підвищення продуктивності та якості зварювання, полегшення умов праці робітників Є.О. Патон пов'язував з механізацією процесу електрозварювання.

Тому Євген Оskarович об'єднав науковців, інженерів-механіків і електриків у творчу групу, яка зайнялася створенням першої автоматичної зварювальної головки. Проведені конструкторські та наукові дослідження, зокрема розробка теорії регулювання дугових автоматів, дозволили винайти першокласну зварювальну головку А-66, яка була успішно впроваджена у промислове виробництво.



У відділі міцності зварних конструкцій





Є.О. Патон у робочому кабінеті. Поряд (зліва направо)  
В.Є. Патон, П.І. Севбо, Б.Є. Патон

Євген Оскарович у своїй науковій діяльності завжди виступав проти так званої «чистої науки» і підкреслював, що не варто братися одночасно за вирішення великої кількості проблем, а започатковану наукову роботу треба доводити до масового впровадження її результатів у виробництво.

У грудні 1940 р. керівництво країни прийняло рішення про впровадження швидкісного зварювання під флюсом на 20-ти заводах і Євгену Оскаровичу Патону було доручено забезпечити виконання цієї постанови з одночасним покладанням на нього обов'язків керівника відділу електрозварювання Центрального науко-

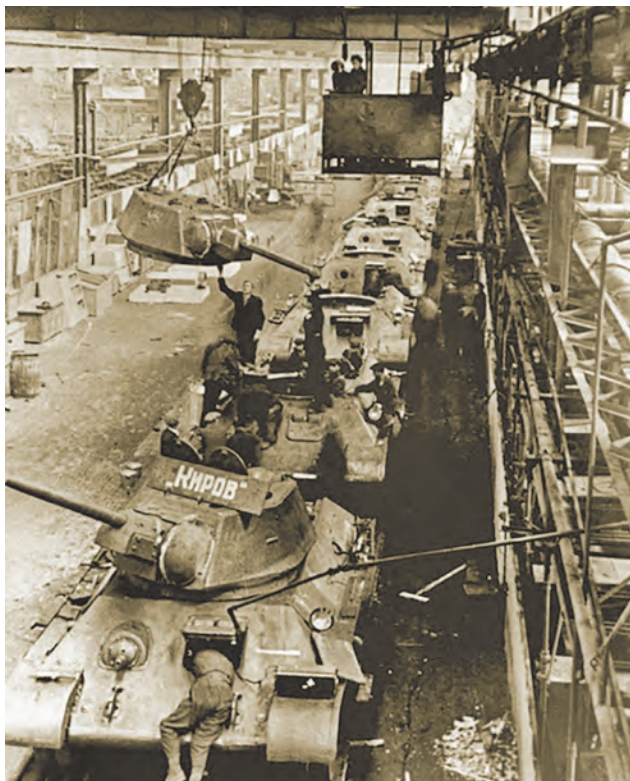
во-дослідного інституту технології і машинобудування, а також члена Ради з машинобудування при Раднаркомі СРСР із збереженням керівництва Інститутом електрозварювання.

У 1940 р., вшановуючи 40-річну наукову, інженерну та педагогічну діяльність, Є.О. Патона нагороджено орденом Трудового Червоного Прапора та присвоєно звання заслуженого діяча науки і техніки УРСР.

Роботи Євгена Оскаровича та його учнів, виконані у довоєнний період, переконливо довели, що зварювання – це не лише величезне поле наукових досліджень, а й галузь техніки, яка відіграє провідну роль в індустріалізації країни.

У березні 1941 р. за розробку способу та апаратури для швидкісного зварювання під флюсом Є.О. Патон був удостоєний Сталінської премії I ступеня.

Війна застала Євгена Оскаровича у Москві. Восени 1941 р. за його ініціативи колектив Інституту був евакуйований у Нижній Тагіл на «Уралвагонзавод». До Нижнього Тагілу перебазувався й Харківський завод імені Комінтерну, на якому в довоєнний час були виготовлені перші зразки середнього танка Т-34.



Наприкінці 1941 на заводах країни діяло всього три автозварювальні установки, наприкінці 1942 їх було вже 40, наприкінці 1943 – 80, у березні 1944 – 99, у грудні 1944 – 133! На цей час Інститут проводив роботу на 52 заводах.

На Уралвагонзаводі Є.О. Патон очолив роботи з широкого впровадження автоматичного зварювання під флюсом у виробництво танків, артилерійських самохідних установок, авіабомб та інших видів озброєння і боєприпасів. Розробка технології автоматичного зварювання броньових сталей потребувала вивчення багатьох серйозних теоретичних питань, серед яких — схильність зварних з'єднань до утворення тріщин в металі шва і навколошовній зоні та суто практичних проблем.

Визначним досягненням стало відкриття явища саморегулювання потужної електричної дуги при постійній швидкості подачі електродного дроту, що визначило на довгі роки шлях розвитку зварювання під флюсом у світі. І в теперішній час переважна більшість зварювальних автоматів працює за принципом постійної швидкості подачі електрода.

Щоб максимально скоротити терміни освоєння автоматичного зварювання під флюсом військовою промисловістю, вчені Інституту відмовилися від традиційних принципів побудови автоматичного зварювального обладнання і винайшли принципово інші конструктивні рішення



Вагон-лабораторія



Лекція у вагоні-лабораторії для електрозварювальників  
Рижського вагонобудівного заводу, 1948 р.

розробки зварювальної апаратури. У 1942 р. старший науковий співробітник В.І. Дятлов запропонував спростити конструкцію зварювальних апаратів, виключивши складну систему збудження і підтримки довжини дуги. Механічна частина самохідної автоматичної зварювальної головки була розроблена В.Є. Патonom та П.І. Севбо, а електрична схема управління – Б.Є. Патonom. Застосування цього простого, виключно зручного і надійного в експлуатації автомата мало виняткове значення в роки війни і в післявоєнний період.

Під час війни Інститут електрозварювання під керівництвом Є.О. Патона проводив роботу на 52-х заводах. В Інституті було розроблено 20 проектів установок для автоматичного зварювання під флюсом танкових корпусів і 8 — для зварювання бомб і боєприпасів. Завдяки цим розробкам швидкісне зварювання під флюсом не лише здобуло загальне визнання, а й стало основним технологічним процесом. Десятки тисяч бойових машин вийшли з цехів зі швами, що зварені під флюсом. До кінця війни на корпусах танків уже зовсім не було швів, виконаних вручну. Випуск танків для фронту зріс у кілька разів. Наприкінці війни їх кількість перевищила 60 тисяч. Німеччина так і не зуміла механізувати зварювання танків і бронемашин, а Англія і США тільки у 1945 р. почали застосовувати зварювання під флюсом у танковій промисловості.

У січні 1943 р. уряд нагородив Є.О. Патона найвищою нагородою країни — орденом Леніна. В Указі Президії Верховної Ради СРСР було сказано: «За зразкове виконання завдання уряду щодо збільшення випуску танків і бронекорпусів...».

2 березня 1943 р. за видатні науково-технічні досягнення, що прискорили виробництво танків і металоконструкцій, Євген Оскарович був удостоєний почесного звання Героя Соціалістичної Праці із врученням ордена Леніна і золотої медалі «Серп і молот».

У травні 1944 р. Інститут електрозварювання повернувся до м. Київ. У цей період одночасно з ремонтом напівзруйнованої війною будівлі Інституту, оснащенням лабораторій та майстерень, добorem та навчанням кадрів Євген Оскарович наполегливо та успішно займався широким впровадженням автоматичного зварювання під флюсом у промисловість і будівництво задля відбудови країни.

В жовтні 1944 р. у зв'язку з 25-річчям Академії наук УРСР і за роботи, виконані ним у роки війни Е.О. Патон був нагороджений Орденом Великої Вітчизняної війни I ступеня, а в лютому 1945 р. обраний віце-президентом Академії наук УРСР.

У березні 1945 р. Євгену Оскаровичу виповнилося 75 років. Зважаючи на його видатні наукові досягнення, у зв'язку з 75-річчям від дня народження та 50-річчям наукової діяльності, Інституту електрозварювання було присвоєно ім'я академіка Євгена Оскаровича Патона.

Відновлення промисловості у повоєнні роки вимагало великих об'ємів випуску металевих конструкцій. Постає задача в короткий термін розробити нову, надійну технологію і присадні матеріали для зварювання під флюсом широко поширених низьковуглецевих сталей.

Дослідження впливу величини і щільності струму на формування зварного шва і стійкість горіння дуги, виконані в 1945–1948 рр., стали теоретичною основою нового способу шлангового напівавтоматичного зварювання під флюсом тонким електродом.





Зварювання балки мостового перекриття на заводі імені Молотова, м. Дніпропетровськ, 1952 р.

Широкому впровадженню автоматичного і напівавтоматичного зварювання під флюсом сприяла розробка нових типів зварювальної апаратури, створеної в Інституті електрозварювання.

Євген Оскарович надавав виключно великого значення підвищенню продуктивності праці у зварювальному виробництві, а саме — розвитку багатодугового зварювання. Під його керівництвом в Інституті розроблено перші зразки потужних зварювальних апаратів для дводугового зварювання труб і інших виробів, а також зварювальні трактори для дводугового зварювання.

Застосування автоматичного зварювання в перші повоєнні роки стримувалося відсутністю джерел живлення необхідної потужності. З метою створення такого обладнання Є.О. Патон організував великий комплекс досліджень і випробувань. У 1947 р. в Інституті розроблено перші моделі потужних однокорпусних зварювальних трансформаторів-регуляторів на 1000 і 2000 А. На основі цих робіт в подальшому була створена серія трансформаторів-регуляторів, які добре зарекомендували себе навіть в найважчих умовах безперервного виробництва.

Підсумок численних і багаторічних досліджень в області технології і металургії зварювальних процесів, а також зварювального металознавства був викладений Євгеном Оскаровичем, його співробітниками і учнями в монографії «Автоматическая дуговая сварка», яка вийшла з друку у 1947 р. Ця монографія стала навчальним посібником не тільки для студентів вузів, а й для широких кіл фахівців зварювального виробництва.

Є.О. Патон ініціює видання збірників «Праці з автоматичного зварювання під флюсом» (1948 р.), які в подальшому видаються як щомісячний журнал «Автоматичне зварювання».

Принцип виготовлення максимально можливого обсягу металоконструкцій у заводських умовах був закладений Євгеном Оскаровичем у післявоєнні роки. Це давало, у порівнянні з монтажною площадкою, більше можливостей для використання високопродуктивних способів зварювання, забезпечувало більш високу й стабільну якість складально-зварювальних робіт. Яскравим прикладом реалізації такого підходу стало створення в 50-х роках минулого століття в Інституті технології й устаткування для виробництва рулонованих резервуарів. У 1948 р. спільними зусиллями працівників Інституту електрозварювання та Укрнафтоснабу вперше у світовій практиці був виготовлений і змонтований за новим способом резервуар для нафти. У процесі робіт вдало вирішені основні завдання нової технології резервуаробудування.

Роль зварювання була вирішальною і в розвитку домнобудування. Без нього вже було неможливо створювати ефективні конструктивні форми й здійснювати прогрес у технології виплавки чавуну. Перша в країні та Європі суцільнозварна доменна піч обсягом 1033 м<sup>3</sup> за технологією Інституту електрозварювання була зведена в 1948 р. у Запоріжжі.

У перший період зварного домнобудування на монтажній площадці ручне зварювання в основному проводилося на великій висоті, у різних просторових положеннях, часто при несприятливих атмосферних умовах, що відбивалося на якості й темпах будівництва. Усунути цей недолік можна було тільки шляхом індустріалізації будівельного виробництва, створення

й впровадження нових, механізованих способів зварювання. Під керівництвом Євгена Оскаровича було винайдено принципово новий спосіб зварювання — автоматичне зварювання під флюсом вертикальних швів із примусовим їхнім формуванням. Впровадження цього способу в будівельну промисловість сприяло створенню багатьох споруд у суцільнозварному виконанні й забезпечило пріоритет вітчизняної зварювальної науки і техніки.

Яскравим прикладом ефективної співдружності науки й виробництва є результати плідних ділових зв'язків Інституту електрозварювання із заводами важкого машинобудування та металургійними підприємствами. Євген Оскарович відзначав: «Практика не тільки висуває перед наукою нові теми для досліджень, але і штовхає науку на рішення завдань новими методами». Ці слова Євгена Оскаровича повною мірою стосуються електрошлакового зварювання, а також розробки й впровадження у виробництво технологій на основі, які вирішили проблему з'єднання товстостінних конструкцій у важкому машинобудуванні. На основі електрошлакового зварювання були створені нові типи великогабаритних конструкцій, зокрема, унікальних машин і агрегатів великої потужності, станини пресів, обладнання прокатних станів та інших конструкцій.

Інститут електрозварювання по праву є загальноновизнаним лідером в області магістрального трубопровідного транспорту. Величезне значення для розвитку трубної промисловості мали роботи, проведені під керівництвом Євгена Оскаровича, зі створення технології і обладнання для автоматичного зварювання сталевих труб великого діаметру.

Спроектвані в Інституті електрозварювання установки та трубозварювальний стан були першими в СРСР агрегатами для дугового зварювання труб. Швидкісний трубозварювальний стан для потокового безперервного зварювання труб діаметром 529...720 мм побудований у 1949 р. на Новокраматорському заводі й установлений на Харцизькому трубному заводі. Апаратура для зварювання труб була виготовлена в Інституті електрозварювання. Завдяки застосуванню новітньої зварювальної апаратури продуктивність трубного стану зросла у багато разів. Дводуговий спосіб автоматичного зварювання труб, впроваджений на Харцизькому трубному заводі, сприяв бурхливому розвитку вітчизняної трубної промисловості.

Роботи Інституту електрозварювання з впровадження автоматичного зварювання під флюсом у виробництво труб великого діаметра одержали високу оцінку і були відзначені трьома Державними преміями у 1948, 1950 і 1952 рр.

Є.О. Патон надавав великого значення механізації зварювальних робіт на будівництві магістральних трубопроводів. Почалася ця робота у 1948 р. з газопроводу Дашава—Київ, де вперше у світовій практиці при будівництві магістрального трубопроводу застосовано автоматичне зварювання під флюсом.

Будівництво газопроводу Дашава—Київ було завершено у 1949 р., а у 1951 р. завершено його продовження — Київ—Брянськ—Москва. Вся нитка газопроводу побудована з вітчизняних труб із широким застосуванням автоматичного зварювання поворотних стиків труб. Євген Оскарович Патон був призначений в урядову комісію із приймання трубопроводу. З цього періоду за завданням керівництва країни в Інституті електрозварювання успішно проводяться дослідницькі й конструкторські роботи зі створення нових технологій і устаткування для будівництва нафто- і газотрубопроводів.

Великі досягнення щодо створення зварювальних технологій та устаткування дозволили Євгену Оскаровичу поставити питання про будівництво в м. Київ суцільнозварного мосту через Дніпро із застосуванням автоматичного зварювання як у заводських умовах при виготовленні металоконструкцій, так і під час монтажу. Було відомо, що багато попередніх спроб створити зварні мости зазнавали поразки. Тому до зварних мостів у багатьох країнах ставилися з недовірою, що було використано опонентами як аргументи проти реалізації суцільнозварного мосту у Києві. І тільки завдяки високому авторитету Євгена Оскаровича та його інженерній сміливості стало можливим досягти позитивного вирішення цієї проблеми. Уряд підтримав ініціативу щодо впровадження зварювання у мостобудування. Виконуючи його Постанову, Євген Оскарович організував плідну співпрацю вчених та спеціалістів Інституту електрозварювання і проєктантів мостів. Вони здійснили великий комплекс досліджень та розробок з метою розвитку основ проєктування та виготовлення зварних мостів. Завдяки цьому було розроблено



принципово нову конструктивну форму суцільнозварного мосту та технологічні процеси заводського і монтажного зварювання. Для мосту було розроблено спеціальну марку низьковуглецевої сталі, яка мала добру зварюваність. Були розроблені покращені марки зварювальних матеріалів та удосконалено апаратуру для автоматичного і механізованого зварювання. Створення мосту йшло у тісній співпраці Інституту електрозварювання та Київського відділу Державного проектного інституту «Проектстальконструкція», заводу металоконструкцій у м. Дніпропетровськ та інших організацій.



Прогонові будови мосту в період будівництва

По закінченні будівництва новий міст успішно витримав випробування танками, після чого Рада Міністрів Української РСР своєю Постановою затвердила акт Урядової комісії про прийняття його до постійної експлуатації, яка дала оцінку «відмінно». У роботі комісії приймав участь Борис Євгенович Патон. Євген Оскарович не дожив сім місяців до цієї знаменної події. 5 листопада 1953 р. відбулося урочисте відкриття руху по мосту. 18 грудня цього ж року Рада Міністрів Української РСР своєю Постановою присвоїла новозбудованому мосту ім'я Євгена Оскаровича Патона.

Київський міст імені Патона за низкою своїх характеристик є унікальним не тільки в нашій країні, але й у світі. Так, Американське зварювальне товариство відзначило міст у 1995 р. пам'ятним знаком як визначну зварну конструкцію XX століття.

Діяльність Євгена Оскаровича Патона, як вченого і талановитого організатора назавжди залишиться в історії світової науки і техніки. Він залишив величезну науково-технічну спадщину та видатну всесвітньо відому наукову школу, яка зростила плеяду відомих учених, членів Національної академії наук України, докторів і кандидатів наук, талановитих інженерів. Вони примножують під керівництвом Бориса Євгеновича Патона добру славу своєї альма-матер і безумовно зроблять ще багато корисного для розвитку науки і техніки в нашій країні та за її кордонами.

Враховуючи великий вклад Інституту електрозварювання у світову скарбницю знання і технологій в галузі зварювання і споріднених процесів, Міжнародний інститут зварювання у 2000 р. заснував Міжнародну премію імені Євгена Патона – «Eugenij PATON Prize».



Міст ім. Є.О. Патона сьогодні

# ВИКОРИСТАННЯ СТАЛЕЙ КЛАСІВ МІЦНОСТІ С350–С490 ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В.Д. Позняков

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

Досліджено вплив термічних циклів дугового зварювання на структуру і механічні властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань мікрولةгованих конструкційних сталей класу міцності від С350 до С490. Встановлено, що в результаті дії термічних циклів зварювання структура металу зони термічного впливу більшості мікрولةгованих сталей класу міцності від С350 до С490, за винятком сталі 09Г2СЮч, в широкому діапазоні швидкостей охолодження залишається стабільно бейнітною, а механічні властивості суттєво не змінюються. Внаслідок зварювання структура металу зони термічного впливу сталі 09Г2СЮч може змінюватися від бейнітної при помірних швидкостях охолодження до бейнітно-мартенситної та мартенситної по мірі збільшення швидкості охолодження металу. За рахунок цього показники статичної міцності та ударної в'язкості металу зростають, а його пластичні властивості зменшуються. Бібліогр. 12, табл. 5, рис. 7.

*Ключові слова:* конструкційні сталі, термічний цикл зварювання, структура металу, механічні властивості, зварні будівельні конструкції

Одним із головних завдань сучасного розвитку промисловості є підвищення техніко-економічних показників машин, механізмів та інженерних споруд на основі зниження їх питомої металоємності, збільшення експлуатаційної надійності та довговічності. У світовій практиці це досягається за рахунок застосування при виготовленні зварних металевих конструкцій високоміцних сталей з межею плинності 350 МПа і більше.

Зокрема, низьколеговані високоміцні сталі класу міцності С355–С490 широко використовуються в мостобудуванні, при виробництві резервуарів для зберігання і переробки газу та нафти, при виготовленні будівельних конструкцій, тощо. Оскільки переважна більшість зазначених металевих конструкцій є зварними, до таких сталей існують певні вимоги, а саме, вони повинні добре зварюватися, забезпечувати високу пластичність та рівномірність зварних з'єднань, а також показники ударної в'язкості на рівні вимог, які регламентуються державними будівельними нормами, які в останні роки зазнали певних змін. Насамперед ці зміни стосуються показників ударної в'язкості та відносного звуження прокату у Z-напрямку. Згідно сучасним вимогам сталі, а відповідно, метал шва і зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань повинні мати ударну в'язкість  $KCV^{-20} \geq 25$  Дж/см<sup>2</sup> для сталей з  $\sigma_T = 290 \dots 390$  МПа та  $KCV^{-40} \geq 25$  Дж/см<sup>2</sup> для сталей з  $\sigma_T \geq 390$  МПа і відносне звуження у Z-напрямку ( $\Psi_Z$ ) не менше 35, 25 та 15 % для першої, другої та третьої груп конструкцій відповідно.

До теперішнього часу при виготовленні будівельних конструкцій на теренах країн СНД

все ще широко використовуються низьколеговані сталі класу міцності С350–С390, такі як 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД та інші, які були розроблені ще за часів СРСР (табл. 1). Всі зазначені в табл. 1 низьколеговані конструкційні сталі цілком задовольняють сучасним вимогам щодо статичної міцності і пластичних властивостей сталей вздовж та поперек прокату (табл. 2). У більшості із них ударна в'язкість також знаходиться на рівні цих вимог. Але для збереження необхідного рівня показників  $KCV$  металу ЗТВ швидкість охолодження зварних з'єднань в інтервалі температур 600...500 °С ( $w_{6/5}$ ) повинна знаходитися в діапазоні 15...20 °С/с. Це потребує суттєвого обмеження режимів зварювання, що ускладнює технологічний процес та робить його малопродуктивним. Окрім цього,  $\Psi_Z$  у таких сталей не перевищує 15 %, що лімітує їх використання в зварних елементах, які працюють у напрямку товщини прокату.

Починаючи з 1990-х років в металургійній промисловості внаслідок значних економічних, господарських та технічних перетворень відбулись певні зміни. Масовий перехід підприємств на економічну самостійність спонукав до створення сталей, виробництво яких найбільш економічно вигідне для конкретних господарських умов комбінатів. Інтенсивна інтеграція вітчизняної металургії в світову економіку визвала необхідність до перегляду стандартів оцінки якості сталей. Перш за все це стосується оцінки їх ударної в'язкості. Окрім загальноприйнятого у вітчизняній промисловості підходу щодо визначення ударної в'язкості, за результатами іспиту зразків з U-подібним надрізом, почали використовувати зразки, які мають V-подібний надріз. Їх застосування при ви-



Таблиця 1. Вимоги до хімічного складу сталей підвищеної та високої міцності для будівельних конструкцій

Марка сталі	Масова частка елементів, ваг. %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	S	P
09Г2С	≤0,12	0,5...0,8	1,3...1,7	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,3	<0,035	<0,03
15ХСНД	0,12...0,18	0,4...0,7	0,4...0,7	0,6...0,9	0,3...0,6	-	-	-	0,2...0,4	<0,035	<0,03
17Г1С	0,15...0,20	0,4...0,6	1,15...1,6	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,3	<0,035	<0,03
10Г2С1	≤0,12	0,8...1,1	1,3...1,65	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,3	<0,035	<0,03
10ХСНД	≤0,12	0,8...1,1	0,5...0,8	0,6...0,9	0,5...0,8	-	-	-	0,4...0,6	<0,035	<0,03

Таблиця 2. Вимоги до механічних властивостей сталей підвищеної та високої міцності для будівельних конструкцій (не менше)

Марка сталі	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_a$ , МПа	$\delta_5$ , %	$KCU^{-40}$ , Дж/см <sup>2</sup>
09Г2С	350	500	21	34
15ХСНД	350	500	21	29
17Г1С	350	500	22	29
10Г2С1	390	520	19	29
10ХСНД	390	530...660	19	29

пробуваннях дозволяє більш точно оцінити здатність сталей опиратися руйнуванню. В той же час такий підхід виявив певні вади вітчизняних сталей. У зв'язку з цим виникла потреба в модернізації існуючих та створенні нових сталей, які б дозволили задовольнити постійно зростаючі вимоги виробництва. Як результат, в останні роки вітчизняними металургійними комбінатами було освоєно виробництво нових сталей підвищеної та високої міцності, які виготовляються за вітчизняними та міжнародними стандартами і цілком відповідають вимогам Євроном.

Високої міцності, пластичності та ударної в'язкості (табл. 3) сучасні високоміцні конструкційні сталі набувають за рахунок формування в металі дрібнозернистої структури певного складу. Це досягається як за рахунок легування сталей (як правило, вони містять марганець, обмежену до 0,5 % кількість кремнію, до 0,15 % вуглецю та до 0,012 % азоту і мікролеговані окремо або в поєд-

Таблиця 3. Вимоги до механічних властивостей нових мікролегованих сталей підвищеної та високої міцності для будівельних конструкцій (не менше)

Марка сталі, клас міцності	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_a$ , МПа	$\delta_5$ , %	$KCV^{-40}$ , Дж/см <sup>2</sup>
06ГБ, 390	390	490	22	98
06Г2Б, 440	440	540	22	98
09Г2СЮч	450	570	19	29
10Г2ФБ	490	565	22	29

Таблиця 4. Вимоги до хімічного складу нових мікролегованих сталей підвищеної та високої міцності для будівельних конструкцій

Марка сталі, клас міцності	Масова частка елементів, ваг. %										
	C	Si	Mn	Mo	Al	Nb	V	Ce	Cu	S	P
06ГБ, 390	0,04...0,08	0,25...0,50	1,1...1,4	≤0,08	≤0,05	0,01...0,03	0,02...0,05	-	<0,3	<0,01	<0,025
06Г2Б, 440	0,04...0,08	0,25...0,50	1,3...1,6	≤0,10	0,02...0,05	0,03...0,05	0,03...0,07	-	<0,3	<0,01	<0,025
09Г2СЮч	0,08...0,11	0,3...0,6	1,9...2,2	-	0,035...0,065	-	-	0,002...0,005	0,3-0,6	<0,015	<0,02
10Г2ФБ	≤0,15	≤0,35	≤1,7	≤0,3	0,02...0,03	≤0,08	≤0,1	-	-	<0,01	<0,02

нанні ванадієм, алюмінієм, ніобієм, церієм), так і в результаті контрольованої прокатки, або спеціальної термічної обробки сталевих прокату (табл. 4).

Враховуючи те, що зазначені сучасні високоміцні конструкційні сталі, виготовлення яких освоєно на металургійних підприємствах України, мають винятково високі механічні властивості, всі вони були рекомендовані та внесені до Державних будівельних норм як такі, що можуть використовуватися при виготовленні будівельних металевих конструкцій. Для обґрунтування такої можливості в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона були виконані комплексні дослідження, які засвідчили добру здатність цих сталей до зварювання та дозволили визначити умови зварювання, при яких з'єднання даних сталей будуть повністю відповідати сучасним вимогам до металевих будівельних конструкцій.

Оцінка здатності сталей до зварювання зводиться до визначення оптимальних умов зварювання, за яких виключається можливість утворення в з'єднаннях холодних тріщин, а в металі зони термічного впливу структур, які сприятимуть зниженню його міцності, пластичності та холодостійкості.

На відміну від сталевих прокату на формування структури в металі ЗТВ зварних з'єднань високоміцних сталей суттєво впливає термічний цикл зварювання (ТЦЗ) [1–9]. Найбільш суттєві зміни в структурі сталі при зварюванні відбуваються на ділянці перегріву металу ЗТВ, тобто в тій його зоні, яка знаходиться в безпосередній близькості до шва і нагрівається до температури 1300...1150 °С. При дуговому зварюванні параметри ТЦЗ залежать від багатьох факторів. Найважливішими з них є погонна енергія зварювання, початкова температура металу та його товщина, тип зварного з'єднання. Зі збільшенням погонної енергії зварювання та початкової температури металу

швидкість охолодження металу ЗТВ в інтервалі температур 600...500 °C ( $w_{6/5}$ , °C/c) зменшується, а при збільшенні товщини металу – зростає. Зважаючи на це, саме показник  $w_{6/5}$  нами вибрано у якості критерію, який дозволить порівняти реакцію сталей на ТЦЗ та визначити яким чином умови нагріву та охолодження металу впливають на його структуру і механічні властивості.

Дослідження, результати яких наведено в даній статті, виконувалися стосовно оброблених по термічному циклу зварювання зразків та зразків, які виготовлялись з наплавлень на пластину. Вплив термічних циклів зварювання на структуру металу ЗТВ вивчали методом дилатометричних досліджень та оптичної мікроскопії [10]. Механічні випробування на статичний розтяг та ударний вигин проводили з використанням стандартних зразків: тип II по ГОСТ 6996-66 та тип IX по ГОСТ 9454-78.

Для визначення впливу хімічного складу та умов охолодження металу на його структуру використовували діаграми перетворення аустеніту, які побудовані з урахуванням процесів, що відбуваються при зварюванні. При цьому, щоб забезпечити характерну для зварювання високу стійкість аустеніту, при побудові діаграм перетворення вибирали такі умови нагрівання ( $w_H$ ), за яких достатньо чітко починають проявлятися індивідуальні особливості сталей щодо схильності до росту зерна. Зазвичай під час дилатометричних досліджень швидкість нагрівання зразків встановлюють в межах 150...300 °C/c [11]. В наших дослідженнях вона становила 150 °C/c. Швидкості охолодження дилатометричних зразків вибирали виходячи з необхідності забезпечення в інтервалі температур найменшої стійкості аустеніту таких умов охолодження, які будуть максималь-

но наближені до умов охолодження металу на ділянці перегріву зони термічного впливу з'єднань, виконаних на характерних для процесів дугового зварювання режимах.

Швидкість нагрівання регулювали змінюючи по заданій програмі силу струму, який проходить через зразок, а швидкість охолодження – охолоджуючи пристрої, які передають струм від нагрівальної машини до зразка водою, обдуваючи зразки інертним газом.

Завдяки жорсткому закріпленню зразків в нагрівальній машині в них на ділянці рівномірного нагрівання імітуються процеси розвитку внутрішніх деформацій, які по величині і характеру змін близькі до поздовжніх внутрішніх деформацій, що утворюються на ділянці перегріву металу ЗТВ при дуговому наплавленні шару металу на кромки пластин.

Побудовані на підставі діаграми перетворення аустеніту залежності щодо зміни структурних складових, які відбуваються при різних швидкостях охолодження на ділянці перегріву металу ЗТВ нових високоміцних мікролегованих конструкцій сталей, представлено на рис. 1.

На відміну від низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД в яких перетворення аустеніту в значній мірі залежить від швидкості охолодження металу та може відбуватися в феритній (при помірній, до 10 °C/c, швидкості охолодження) та в бейнітній і мартенситній областях при підвищених швидкостях охолодження, в мікролегованих сталях марок 06ГБД, 06Г2Б та 10Г2ФБ воно відбувається суттєво інакше. Майже у всьому дослідженому діапазоні швидкостей охолодження перетворення аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ сталей 06Г2Б та 10Г2ФБ відбувається пере-

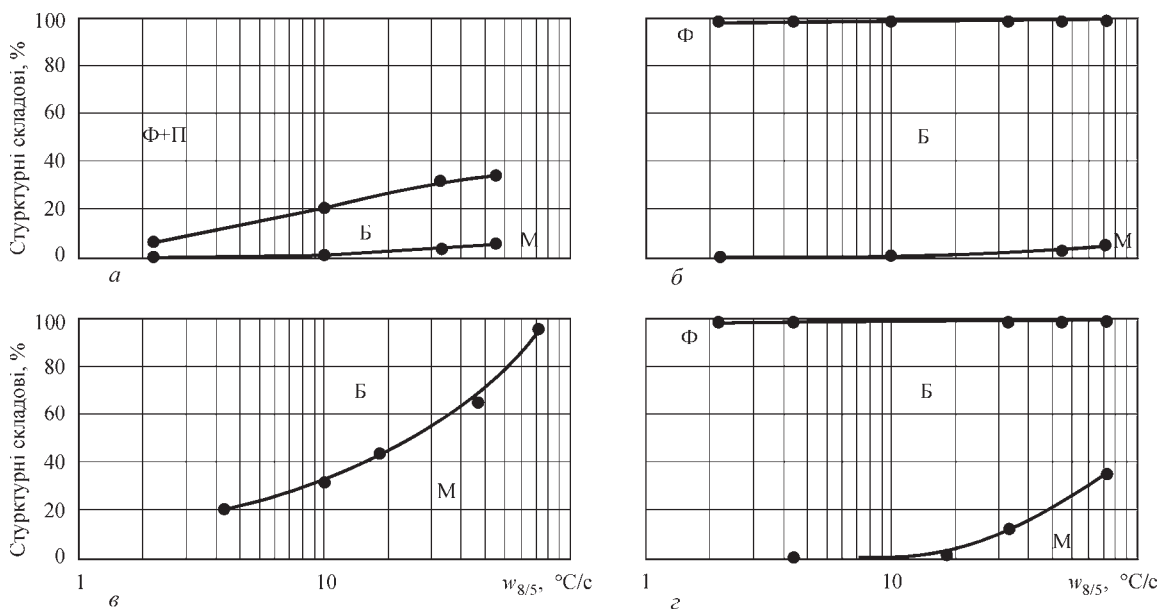


Рис. 1. Діаграми структурних перетворень аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ низьколегованих високоміцних сталей типу 06ГБД (а); 06Г2Б (б); 09Г2СЮч (в); 10Г2ФБ (з)



важно з утворенням бейніту, а в сталі 06ГБД – фериту, перліту та бейніту [1, 2].

Винятком серед досліджених мікролегованих конструкційних сталей є сталь марки 09Г2СЮч [5]. В ній, як в більшості низьколегованих високоміцних конструкційних сталях, перетворення аустеніту відбувається з утворенням бейніту та мартенситу.

Надалі розглянемо як умови охолодження металу під впливом ТЦЗ впливають на його механічні властивості.

Для отримання інформації про вплив ТЦЗ на показники статичної міцності та пластичні властивості металу ЗТВ зварних з'єднань використовують стандартні зразки на розтяг, які виготовляються із заздалегідь оброблених по термічному циклу зварювання брусків металу, що досліджується. Це пов'язано з тим, що зазвичай розміри ЗТВ та окремих її складових значно менші ніж розміри зразків, які випробовуються. Тому в даному випадку дослідження щодо змін межі плинності, межі міцності, відносного подовження та відносного звуження, які відбуваються в металі ЗТВ сталей під впливом ТЦЗ, отримані саме з використанням вище зазначеного підходу. При проведенні досліджень використовувались бруски розміром  $13 \times 13 \times 150$  мм, які оброблялися по термічному циклу зварювання на установці МСР-75, розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [12].

Для моделювання ТЦС зразки нагрівалися струмом, що проходить, до температури  $1250^\circ\text{C}$  (швидкість нагріву  $150^\circ\text{C/s}$ ), а потім охолоджува-

лися за заданою програмою. За рахунок регулювання інтенсивності обдування зразків інертним газом швидкість їх охолодження в інтервалі температур  $600 \dots 500^\circ\text{C}$  змінювали від 3 до  $50^\circ\text{C/s}$ . Режим нагріву–охолодження зразків контролювався хромельалюмельовою термопарою діаметром 0,5 мм, а швидкість охолодження оцінювалася за результатами обробки осцилограм, запис яких проводили на осцилографі 117/1 в координатах температура – час.

Для випробування на статичний (короточасний) розтяг із оброблених по ТЦЗ брусків механічним способом виготовляли зразки типу II відповідно до ГОСТ 6996-96 (по 2 зразки на кожну швидкість охолодження). Випробування виконували відповідно до ГОСТ 6996-66 при температурі  $20^\circ\text{C}$ . Результати досліджень наведено на рис. 2.

Вони свідчать про те, що при охолодженні металу на ділянці перегріву ЗТВ з швидкістю охолодження  $w_{6/5}$ , яка не перевищує  $10^\circ\text{C/s}$ , він може знеміцнюватися. Це проявляється в тому, що значення його межі плинності зменшуються по відношенню до основного металу на  $10 \dots 25\%$ . В діапазоні швидкостей від  $3 \dots 10^\circ\text{C/s}$  значення  $\sigma_{0.2}$  та  $\sigma_B$  металу ЗТВ стрімко зростають та в подальшому підвищуються досить повільно. Це цілком закономірно, оскільки, як свідчать дані, наведені на рис. 2, структура металу ЗТВ високоміцних мікролегованих конструкційних сталей в широкому діапазоні швидкостей охолодження є стабільною. Пластичні властивості металу ЗТВ цих сталей також дещо зменшуються, але залишаються досить

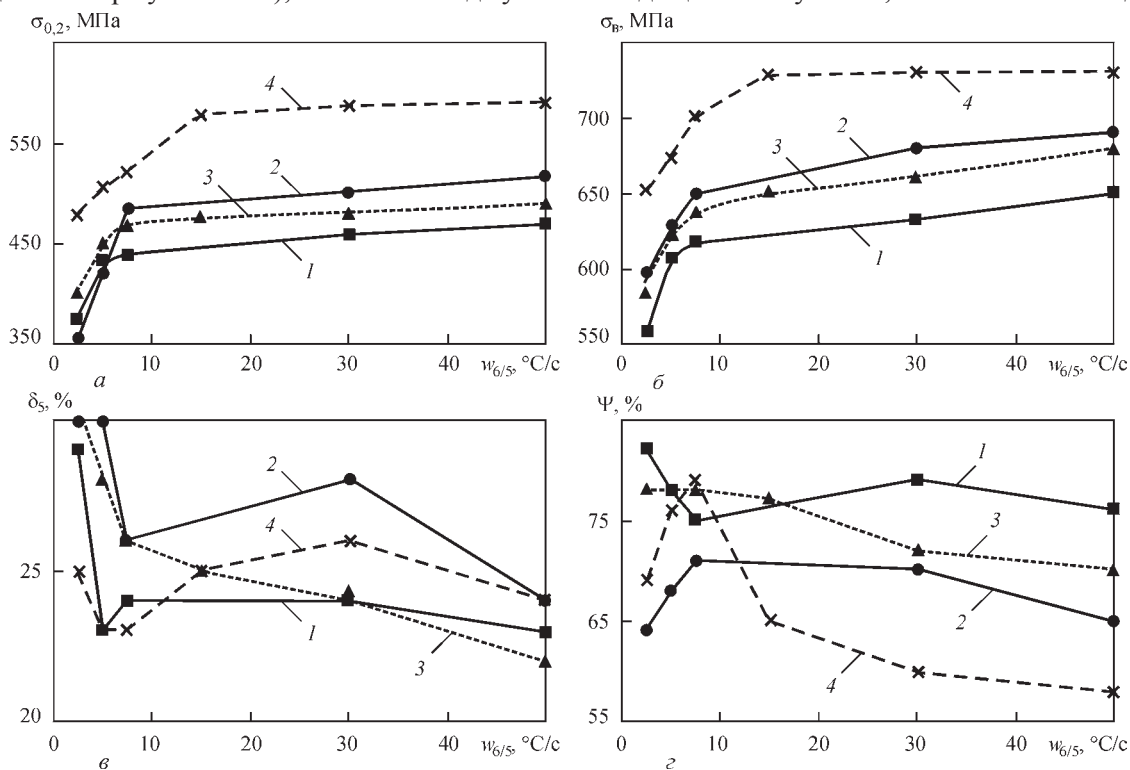


Рис. 2. Вплив швидкості охолодження  $w_{6/5}$  на показники межі плинності (а), межі міцності (б), відносного подовження (в) та відносного звуження (г) металу ЗТВ сталей: 06ГБД (1), 09Г2СЮч (2), 06Г2Б (3), 10Г2ФБ (4)

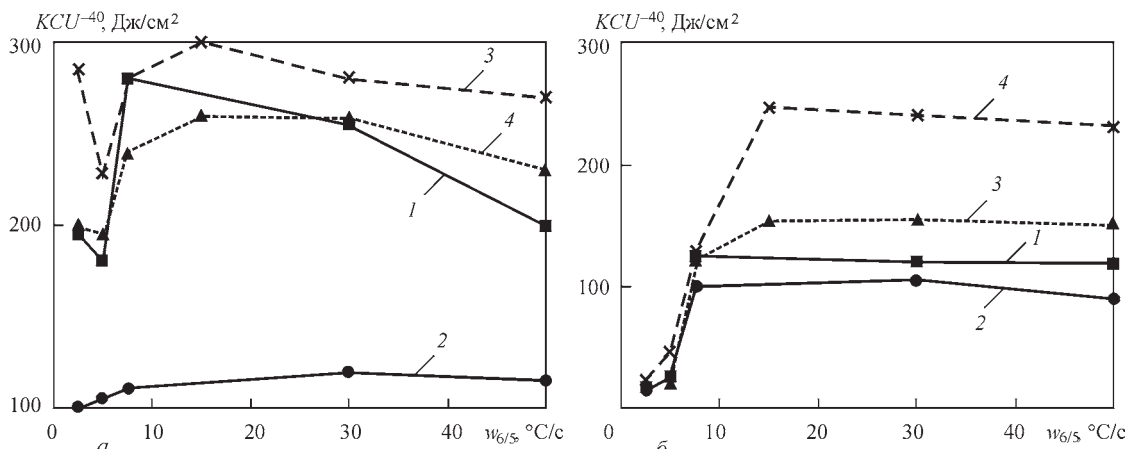


Рис. 3. Вплив швидкості охолодження  $w_{6/5}$  на показники ударної в'язкості металу ЗТВ сталей 06ГБД (1), 09Г2СЮч (2), 06Г2Б (3), 10Г2ФБ (4)

високими та стабільними в широкому діапазоні швидкостей охолодження.

Вплив термічних циклів зварювання (ТЦЗ) на показники ударної в'язкості металу ЗТВ конструкційних сталей, що досліджувались, вивчали з використанням «валикової проби» відповідно до ГОСТ 13585-68.

Щоб забезпечити умови охолодження зварних з'єднань з характерною для ручного, механізованого в захисних газах та автоматичного під шаром флюсу дугових процесів зварювання металу різної товщини, а саме в діапазоні від 3,0 до 50 °C/c, наплавлення на пластини товщиною 20 мм виконували дротом суцільного перетину діаметром 4,0 мм під шаром флюсу на режимах, які наведено у табл. 5.

Для визначення ударної в'язкості із «валикової проби» вирізалися заготовки, з яких виготовлялися зразки перерізом 10×10×55 мм (тип VI з круглим надрізом і тип IX з гострим надрізом). Випробування зразків проводили при температурі -40 °C.

Дослідження, результати яких наведено на рис. 3, показали, що за умов охолодження ЗТВ зварних з'єднань з швидкістю  $w_{6/5}$  більше ніж 5 °C/c ударна в'язкість металу  $KCV^{-40}$  на ділянці перегріву забезпечується на рівні, який суттєво перевищує сучасні вимоги до будівельних металевих конструкцій. При більш уповільненому охолодженні значення  $KCV^{-40}$  можуть зменшуватися до критичних позначок.

В цілому виконані дослідження засвідчили, що нові мікрولةговані конструкційні сталі класів Таблиця 5. Режими, на яких виконувалося наплавлення на пластини

$I_{зв}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{зв}$ , М/Г	$Q_{зв}$ , кДж/см	$w_{8/5}$ , °C/c
580...600	34...38	9,8	62,7	3
580...600	34...38	14,7	41,8	6
580...600	34...38	17,3	35,7	10
580...600	34...38	21,7	28,6	20
380...400	30...32	15,2	23,0	30
380...400	30...32	20,1	16,7	50

міцності С350–С490 за механічними властивостями переважають низьколеговані конструкційні сталі класів міцності С350–С390, які були розроблені в СРСР, є більш технологічними і дозволяють забезпечити комплекс властивостей зварним з'єднанням на рівні сучасних світових вимог до металевих будівельних конструкцій. Саме це було поштовхом до того, що з початку нинішнього тисячоліття такі сталі почали в Україні поетапно впроваджуватися у виробництво для виготовлення зварних металевих конструкцій для потреб будівельної галузі в мостобудуванні, машинобудуванні, тощо.

Зокрема, розроблені на основі наведених вище результатів досліджень технологічні процеси дугового зварювання у 2003 р. впроваджені при виготовленні унікальних будівельних споруд при будівництві у м. Броди резервуару для зберігання нафти місткістю 75000 м³ із сталевого прокату 06Г2Б класу міцності С440 (рис. 4).

В подальшому набутий при виконанні даної роботи досвід було використано під час виготовлення металоконструкції резервуарів місткістю 50000 м³ при модернізації резервуарного парку в м. Мозир (Республіка Білорусь) на ділянці магістральних нафтопроводів. Металеві конструкції виготовлені зі сталевого прокату 06ГБ класу міцності С390 товщиною 20...30 мм із застосуванням механізованого зварювання в

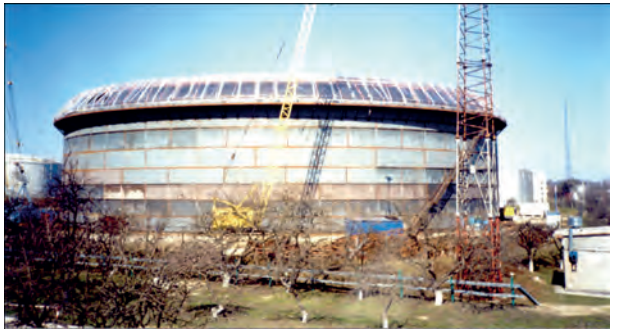


Рис. 4. Резервуар для зберігання нафти місткістю 75000 м³ із сталевого прокату 06Г2Б-440





Рис. 5. Будівництво Подільського мостового переходу у м. Києві, арки якого виготовлено зі сталі 06ГБД класу міцності С390

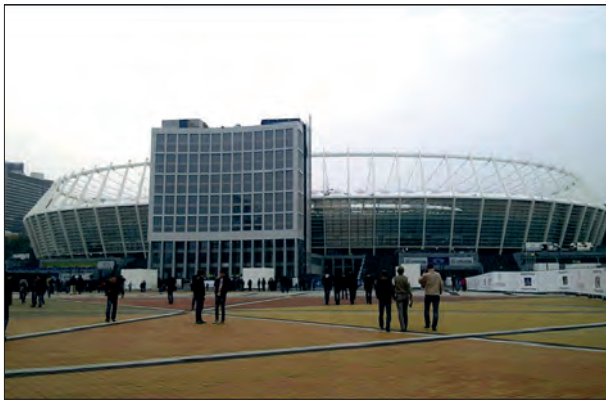


Рис. 6. НСК «Олімпійський» у м. Києві

суміші газів (82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>) дротом суцільного перетину.

У 2006 р. сталь 06ГБД класу міцності С390 та технології її зварювання застосовано при виготовленні на заводі металоконструкцій ім. І.В. Бабушкіна (м. Дніпро) металевих конструкцій для Подільського мостового переходу через р. Дніпро у м. Києві (рис. 5).

При підготовці до проведення в Україні європейського футбольного чемпіонату ЄВРО-2012 було розроблено та атестовано технології автоматичного зварювання під шаром флюсу, механізованої в захисних газах і ручного дугового зварювання сталі S 355 J2 (аналог сталі 10Г2ФБ класу міцності С355)) товщиною 16...100 мм. У 2010–2011 рр. вони були впроваджені під час виготовлення і при монтажі коробчастих металоконструкцій для навісу над НСК «Олімпійський» (м. Київ) в період його реконструкції. Зварна металоконструкція загальною вагою 40 тис. т складається з 80 нижніх і фасадних колон довжиною від 23 до 25,5 м, вагою від 25 до 30 т кожна, а також балок нижнього і верхнього стиснутого кілець (рис. 6).

Набутий при реконструкції НСК «Олімпійський» досвід сприяв успішному виконанню у 2013 р. нового завдання, а саме, розробці технології зварювання для виготовлення і монтажу металоконструкцій трубчастого перетину із сталі



Рис. 7. Ремонт доменної печі ДП-2 на ВАТ «Меткомбінат Азовсталь» з використанням сталевих прокатів 06Г2Б класу міцності С440

10Г2ФБЮ класу міцності С490 для футбольного стадіону на 45 000 глядачів.

Все більш широкого використання нові конструкційні високоміцні сталі знаходять в Україні і при будівництві та капітальному ремонті інженерних споруд металургійних підприємств. Зокрема, сталь марки 06Г2Б класу міцності С440 та розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона зварювальні технології були впроваджені під час ремонту доменної печі ДП-2 на ВАТ «Меткомбінат Азовсталь» (рис. 7), а також на Єнакієвському та Криворізьському металургійних комбінатах.

## Висновки

1. На відміну від більшості конструкційних низьколегованих сталей, перетворення аустеніту в мікролегованих ванадієм та ніобієм сталях класу міцності від С350 до С 490 при безперервному охолодженні по термічному циклу зварювання відбувається переважно в бейнітній області.

2. Внаслідок структурних перетворень, які відбуваються в сталях під впливом термічних циклів зварювання, показники статичної міцності металу зони термічного впливу зварних з'єднань зростають, а пластичні властивості зменшуються.

3. Істотне зменшення показників ударної в'язкості в металі зони термічного впливу зварних з'єднань мікролегованих конструкційних сталей спостерігається при  $w_{6/5} \leq 5$  °C/с. Із збільшенням швидкості охолодження ударна в'язкість металу зони термічного впливу стрімко зростає, та в деяких сталях майже досягає рівня основного металу.

## Список літератури

1. Позняков В.Д., Довженко В.А., Максименко А.А. и др. (2010) Структурные превращения при сварке стали 10Г2ФБ и свойства сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **11**, 12–16.
2. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. и др. (2013) Свариваемость экономнолегированных сталей 06ГБД и 06Г2Б. *Там же*, **4**, 9–16.
3. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. (2012) Структура и свойства сварных соединений стали С390 (S355 J2). *Там же*, **8**, 7–11.
4. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Завдоев А.В. и др. (2016) Свариваемость высокопрочной микролегированной стали S460M. *Там же*, **12**, 23–30.
5. Миходуй Л.И., Кирьян В.И., Позняков В.Д. и др. (2003) Экономнолегированные высокопрочные стали для сварных конструкций, *Там же*, **5**, 36–40.
6. Ufuah E. (2013) Elevated Temperature Mechanical Properties of Butt-Welded Connections Made with High Strength Steel Grades S355 and S460M. *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures International Conference Proceedings, Miskolc, Hungary, April 24–26*, pp. 407–412.
7. Nazarov A., Yakushev E., Shabalov I. et al. (2014) Comparison of weldability of high-strength pipe steels microalloyed with niobium, niobium and vanadium. *Metallurgist*, **7**, 9–10, 911–917.
8. Ragu Nathan S., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Rao A. G. (2015) Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. *Defence Technology*, **11**, 308–317.
9. Show. B.K., Veerababu, R., Balamuralikrishnan, R., Malakondaiah, G. (2010) Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of microalloyed HSLA steel. *Mater. Sci. Eng. A*, **527**, 1595–1604.
10. Григоренко Г.М., Костин В.А., Орловский В.Ю. (2008) Современные возможности моделирования превращений аустенита в сварных швах низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*, **3**, 31–34.
11. Seyffarth P. (1982) *Schweiss – Z.T.U. – Schaubilder*. Berlin, VEB Verlag.
12. Саржевский В.А., Сазонов В.Я. (1981) Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР75. *Автоматическая сварка*, **5**, 69–70.

## References

1. Zhdanov, S.L., Poznyakov, V.D., Maksimenko, A.A. Dovzhenko, V.A. et al. (2010) Structure and properties of arc-welded joints on steel 10G2FB. *The Paton Welding J.*, 8–12.
2. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Maksimenko, A.A. et al. (2013) Weldability of sparsely-alloyed steels 06GBD and 06G2B. *Ibid.*, **4**, 8–14.
3. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Maksimenko, A.A. (2012) Structure and properties of welded joints of steel S390 (S355 J2). *Ibid.*, **8**, 6–10.
4. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Zavdoveev, A.V. et al. (2016) Weldability of high-strength microalloyed steel S460M. *Ibid.*, **12**, 23–30.
5. Mikhoduj, L.I., Kirian, V.I., Poznyakov, V.D. et al. (2003) Sparsely-alloyed high-strength steels for welded structures. *Ibid.*, **5**, 34–37.
6. Ufuah, E. (2013) Elevated temperature mechanical properties of butt-welded connections made with high-strength steel grades S355 and S460M. *In: Proc. of Int. Conf on Design, Fabrication and Economy of Metal Structures (Miskolc, Hungary, April 24–26)*, 407–412.
7. Nazarov, A., Yakushev, E., Shabalov, I. et al. (2014) Comparison of weldability of high-strength pipe steels microalloyed with niobium and vanadium. *Metallurgist*, **7**(9–10), 911–917.
8. Ragu Nathan, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rao, A.G. (2015) Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. *Defense Technology*, **11**, 308–317.
9. Show. B.K., Veerababu, R., Balamuralikrishnan, R., Malakondaiah, G. (2010) Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of microalloyed HSLA steel. *Mater. Sci. Eng. A*, **527**, 1595–1604.
10. Grigorenko, G.M., Kostin, V.A., Orlovsky, V.Yu. (2008) Modern possibilities for modeling of austenite transformations in low-alloyed steel welds. *The Paton Welding J.*, **3**, 31–34.
11. Seyffarth, P. (1982) *Schweiss – Z.T.U. – Schaubilder*. Berlin, VEB Verlag.
12. Sarzhevsky V.A., Sazonov, V.Ya. (1981) Installation for simulation of welding thermal cycles based on machine MCR75. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 69–70 [in Russian].

## USE OF STEELS OF STRENGTH CLASS C350-C490 IN THE PRODUCTION OF BUILDING WELDED STRUCTURES

V.D. Poznyakov

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The effect of thermal cycles of arc welding on the structure and mechanical properties of metal of the heat-affected-zone of welded joints of microalloyed structural steels of strength class from C350 to C490 was investigated. It was established that as a result of the action of thermal welding cycles, the metal structure of the heat-affected-zone of most microalloyed steels of strength class from C350 to C490, except for 09G2SYuch steel, remains stable bainite in a wide range of cooling rates, and mechanical properties do not change significantly. As a result of welding, at moderate cooling rates the structure of the heat-affected-zone metal in the steel 09G2SYuch can change from bainite to bainite-martensitic and martensitic as the metal cooling rate increases. As a result of that, the values of static strength and impact toughness of the metal are increasing and its ductile properties are reduced. 12 Ref., 5 Tabl., 7 Fig.

**Keywords:** structural steels, thermal cycle of welding, metal structure, mechanical properties, welded building structures

Надійшла до редакції  
17.01.2020



## РОЗРОБКА ЗВАРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ БІЧНОЇ РАМИ ВІЗКА ВАНТАЖНОГО ВАГОНУ ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ

Л.М. Лобанов, О.В. Махненко, В.В. Книш, С.А. Соловей, В.І. Павловський

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

Аварії, які трапляються на залізницях колії 1520 мм, часто пов'язані з руйнуванням литих несучих елементів трьохелементних візків вантажних вагонів. Наявність невиявлених дефектів лиття суттєво знижує характеристики опору втомі литих деталей та сприяє передчасному їх руйнуванню. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона запропоновано нову, альтернативну традиційному литтю, конструкцію бічної рами з листового прокату сталі 09Г2С для трьохелементного візка вантажного вагону з осьовим навантаженням 23,5 тс. Розроблена суцільнозварна конструкція бічної рами на основі широкого застосування математичного моделювання для визначення напружено-деформованого стану зварних елементів візка під дією регламентованого спектру навантажень та оцінки міцності згідно з діючими стандартами та сучасними світовими підходами. Обґрунтовано, що проектування конструкцій бічної рами необхідно проводити за рекомендаціями МІЗ, оскільки вони є більш консервативними. Було створено технологію збирання та зварювання, а також відповідне спеціалізоване оснащення для виготовлення розробленої конструкції зварної бічної рами. Виготовлено два дослідних зразка та проведено прискорені випробування на втому, результати яких показали суттєве підвищення довговічності та живучості при експлуатаційних циклічних навантаженнях у порівнянні з існуючими конструкціями литих бічних рам. Високі показники опору втомі розробленої в ІЕЗ ім. Є.О. Патона конструкції суцільнозварної бічної рами візка вантажного вагону дають всі підстави рекомендувати дану конструкцію до впровадження на залізницях колії 1520 мм. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова:* візок вантажного вагону, бічна рама, зварна конструкція, технологія виготовлення, опір втомі, довговічність, живучість, математичне моделювання, розрахунок, втомні випробування

Відомо, що на залізницях колії 1520 мм трапляються аварії, пов'язані з руйнуванням литих несучих елементів трьохелементних візків вантажних вагонів [1–3]. Цьому сприяє наявність дефектів лиття в зонах з напруженнями 0,75...1,0 від допустимих напружень, які призводять до суттєвого зниження характеристик опору втомі та відповідно до передчасного руйнування вже за 2...23 роки експлуатації [3]. Підвищити надійність бічних рам та надресорних балок можливо за рахунок вдосконалення процесу лиття та вихідного неруйнівного контролю або виробництвом даних деталей за альтернативними технологіями. Наприклад, виготовлення зазначених деталей із листового прокату сталі 09Г2С за рахунок використання технологій зварювання з метою підвищення характеристик опору втомі [4]. Слід зазначити, що використання зварювання є більш технологічно привабливим, оскільки всі виявлені дефекти стадії виробництва легко усуваються, на відмінність від литих деталей.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України проведено значний обсяг робіт із розробки нової суцільнозварної конструкції бічної рами трьохелементного візка вантажного вагону з осьовим навантаженням 23,5 тс і технології виготовлення [5]. Розробка проводилась на основі широкого застосування математичного моделювання

для визначення напружено-деформованого стану зварних елементів візка під дією регламентованого спектру навантажень та оцінки міцності згідно з діючими стандартами [6] та сучасними світовими підходами [7].

Було виконано розрахунок опору втомі розробленої конструкції суцільнозварної бічної рами візка відповідно до Норм [6] за коефіцієнтами опору втомі для різних оціночних зон (основного металу та зварних швів) з урахуванням розподілу коефіцієнта вертикальної динаміки за діапазонами швидкостей експлуатації (спектр навантаження), а також з урахуванням додаткового спектру навантаження від поздовжніх стискаючих сил через автозчеплення показав, що розроблена суцільнозварна конструкція бічної рами є працездатною при змінних навантаженнях і задовольняє вимогам Норм [6] з коефіцієнтом опору втомі  $[n] = 2$  як за умови неперевиконання розрахунковими напруженнями величин амплітуд напружень, що допускаються, так і за умови накопичення пошкоджуваності.

Коефіцієнт опору втомі конструкції оцінюється за формулою [6]:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,e}} \geq [n], \quad (1)$$

де  $\sigma_{a,N}$  – границя витривалості (за амплітудою) при симетричному циклі навантаження на базі випроб-

увань  $N_0 = 10^7$  циклів;  $\sigma_{a,e}$  – розрахункова величина амплітуди динамічного напруження умовного симетричного циклу, еквівалентна за ушкоджувальною дією реальному режиму експлуатаційних напружень за термін служби деталі;  $[n]$  – допустима мінімальна величина коефіцієнта опору втомі  $[n] = 2$  обирається відповідно до Норм [6] для візка, що проектується знову.

Границя витривалості (за амплітудою) при симетричному циклі навантаження визначається за [6]:

$$\sigma_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{K_\sigma} (1 - z_p v_\sigma), \quad (2)$$

де  $\bar{\sigma}_{-1}$  – середнє значення границі витривалості гладкого стандартного зразка;  $z_p$  – квантиль розподілу  $\sigma_{a,N}$  як випадкової величини;  $v_\sigma$  – коефіцієнт варіації границі витривалості;  $K_\sigma$  – середнє значення коефіцієнта зниження границі витривалості деталі стосовно границі витривалості гладкого стандартного зразка.

Розрахункова величина амплітуди динамічного напруження умовного симетричного циклу, еквівалентна за ушкоджувальною дією реальному режиму експлуатаційних напружень за термін служби деталі, розраховується з урахуванням розподілу коефіцієнта вертикальної динаміки за десятима діапазонами швидкостей експлуатації [6]:

$$\sigma_{a,e} = \max(\sigma_a)^m \sqrt{\frac{T_p f_e}{N_0} \sum_{i=1}^{10} P(v_i) k_i^m}, \quad (3)$$

де  $m$  – показник степеня у рівнянні кривої втомі в амплітудах;  $T_p$  – сумарний час динамічних навантажень за розрахунковий термін служби деталі;  $f_e$  – ефективна частота процесу зміни динамічних навантажень для обресорених частин,  $f_e = \sqrt{4c/m_k}$  ( $c$  – вертикальна жорсткість ресорного комплексу під вагою вагону брутто;  $m_k$  – вага навантаженого кузова);  $N_0$  – базове число циклів динамічних напружень;  $i$  – номер діапазонів швидкості;  $P(v_i)$  – частка часу, що припадає на експлуатацію у  $i$ -му

діапазоні швидкості ( $v_i$  – середнє значення швидкості у  $i$ -му діапазоні);  $k_i$  – коефіцієнт вертикальної динаміки у  $i$ -му діапазоні швидкості;  $\max(\sigma_a)$  – максимальна амплітуда напружень при симетричному циклі навантаження.

З формул, наведених вище, допустимі максимальні амплітуди напруження за критерієм опору втомі виражаються наступним чином:

$$[\max(\sigma_a)] = \frac{\sigma_{a,N}}{[n]^m \sqrt{\frac{T_p f_e}{N_0} \sum_{i=1}^{10} P(v_i) k_i^m}}. \quad (4)$$

У випадку зварної конструкції бічної рами для різних оціночних зон основного матеріалу та металу зварних з'єднань обчислюються декілька значень допустимих амплітуд напружень за критерієм опору втомі. Для оцінки опору втомі бічної рами прикладалися навантаження, що відповідають режиму нормального руху вагону у складі потягу:

- вертикальна сила, зменшена на величину сили ваги кузова вагону брутто;
- поперечна складова повздовжньої квазістатичної сили.

Величина (амплітуда) навантажень визначається коефіцієнтом вертикальної динаміки у діапазоні швидкостей руху до конструкційної (120 км/год). Коефіцієнт вертикальної динаміки прийнято однаковим для руху по прямих і кривих ділянках шляху. Розрахунковий спектр навантаження [6, 8] наведено у табл. 1.

Чисельним методом на основі МСЕ, визначалися максимальні напруження при квазістатичному навантаженні вертикальним зусиллям величиною 210,6 кН та зусиллям розпору клинів – 30,1 кН [8], відносно якого задано спектр навантаження (табл. 1). Вертикальне динамічне навантаження  $F_{1z}$ , що діє на бічну раму, прикладається до опорної поверхні центрального ресорного підвішування, сила розпору клинів  $F_{3x}$  – до вертикальних стійок центрального ресорного отвору (рис. 1). Результати розрахунків розподілу мак-

**Таблиця 1. Нормативні навантаження для розрахунку опору втомі бічної рами візка з осевим навантаженням 23,5 тс**

Інтервал швидкості руху, м/с	Середня швидкість інтервалу, м/с	Ймовірність руху в діапазоні швидкостей $P(v_i)$	Бічна рама		
			Коефіцієнт вертикальної динаміки $k_d$	Амплітуда вертикального динамічного навантаження $F_{1z}$ , кН	Амплітуда сили розпору клинів $F_{3x}$ , кН
0...12,5	6,25	0,03	0,063	13,27	1,90
12,5...15,0	13,75	0,07	0,138	29,07	4,15
15,0...17,5	16,25	0,09	0,298	62,77	8,97
17,5...20,0	18,75	0,12	0,333	70,14	10,02
20,0...22,5	21,25	0,16	0,368	77,52	11,07
22,5...25,0	23,75	0,19	0,403	84,89	12,13
25,0...27,5	26,25	0,16	0,438	92,26	13,18
27,5...30,0	28,75	0,10	0,473	99,63	14,23
30,0...32,5	31,25	0,06	0,508	107,01	15,29
32,5...35,0	33,75	0,02	0,543	114,38	16,34



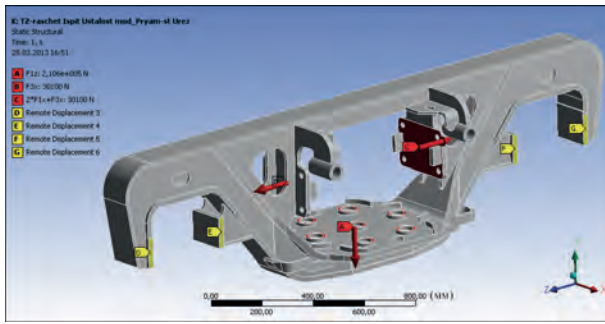


Рис. 1. Вертикальне навантаження  $F_{1z} = 210,6$  кН (А), рівномірно розподілене по площі спирання пружин на опорній поверхні центрального ресорного підвішування, і сили розпору клинів  $F_{3x} = 30,1$  кН (В), які прикладено до вертикальних стійок центрального ресорного отвору

симальних головних напружень від прикладеного квазістатичного навантаження подані на рис. 2 та в табл. 2.

Додатково проведений розрахунок опору втомі суцільнозварної конструкції бічної рами візка відповідно до Рекомендацій Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) [7] за умовою зародження втомного руйнування (макротріщини) в різних оціночних зонах конструкції (зонах зварних з'єднань) з урахуванням заданого спектру навантаження при експлуатації [6] показав, що розроблений варіант суцільнозварної конструкції бічної рами має достатній рівень опору втомі зварних з'єднань з коефіцієнтом безпеки  $\gamma_M = 1,1 \dots 1,4$ .

Рекомендації МІЗ узагальнюють значний обсяг експериментальних досліджень для типових зварних з'єднань, що дозволило для кожного з'єднання сформулювати методику з визначення розмаху номінальних напружень, що допускаються при регулярному навантаженні у вигляді:

$$[\Delta\sigma] = \frac{FAT f_1(R) f_2(N) f_3(\partial) f_4(T)}{\gamma_M}, \quad (5)$$

де  $FAT$  – клас з'єднання і його допустимий розмах напружень на базі  $2 \cdot 10^6$  циклів регулярного навантаження (постійні параметри циклу навантаження) при  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \gamma_M = 1$ ;  $\gamma_M$  – коефіцієнт безпеки. В роботі [7] є таблиця значень  $FAT$  для різних типових зварних з'єднань. Множник  $f_1(R)$  враховує вплив асиметрії циклу навантаження  $R = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{\max}}$ ,

а також рівень залишкових напружень в зоні з'єднання. У випадку, якщо залишкові напруження не перевищують  $0,2\sigma_T$ , де  $\sigma_T$  – межа текучості матеріалу (для сталі 09Г2С  $\sigma_T \approx 390$  МПа), то за [7]:

$$\begin{aligned} f_1(R) &= 1,6 \text{ для } R < -1,0; \\ f_1(R) &= -0,4R + 1,2 \text{ для } -1,0 \leq R \leq 0,5; \\ f_1(R) &= 1,0 \text{ для } R > 0,5. \end{aligned}$$

Множник  $f_2(N)$  враховує обмежену втому. У діапазоні  $10^4 < N < 10^8$  циклів  $f_2(N)$  згідно з [7] (рис. 2) визначається залежністю:

$$f_2(N) = \left( \frac{C}{N} \right)^{\frac{1}{m}},$$

де  $N$  – довговічність зварного з'єднання;  $C = 2 \cdot 10^6$ ,  $m = 3$  при  $10^4 < N < 10^7$  циклів;  $C = 5,8 \cdot 10^6$ ,  $m = 5$  при  $10^7 < N < 10^8$  циклів.

Поправка на товщину елемента, що примикає, в якому виникає тріщина від втоми,  $f_3(\delta) = 1,0$ , якщо товщина  $\delta < 25$  мм. При більших товщинах:

$$f_3(\delta) = \left( \frac{25}{\delta} \right)^{0,3}.$$

Для розглянутих з'єднань конструкції бічної рами з товщиною елементів до 25 мм можна прийняти  $f_3(\delta) = 1,0$ .

Множник  $f_4(T)$  враховує робочу температуру  $T$  експлуатації з'єднання. За [7] при  $T < 100$  °С можна приймати  $f_4(T) = 1,0$ .

При призначенні величини коефіцієнта безпеки  $\gamma_M$  слід враховувати, що  $FAT$  рекомендують на основі 0,95 ймовірності неруйнування (експериментальні дані). Тому в [7] рекомендують вибирати  $\gamma_M$  в межах  $1,0 \dots 1,4$ . Причому величина коефіцієнта безпеки  $\gamma_M = 1,4$  відповідає випадку, коли має місце загроза людському життю.

Спектр навантажень для розрахунку опору втомі визначається коефіцієнтом вертикальної динаміки та ймовірністю руху в діапазоні швидкостей руху до конструкційної (120 км/год).

З урахуванням викладеного для розглянутих оціночних зон конструкції бічної рами (зон зварних з'єднань) при регулярному навантаженні залежність (5) можна представити у вигляді:

$$[\Delta\sigma] = \frac{FAT}{\gamma_M} \left( \frac{C}{N} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (6)$$

Відповідно гранична довговічність  $[N]$  при регулярному навантаженні з розмахом  $\Delta\sigma$  виражається наступним чином:

$$[N] = C \left( \frac{FAT}{\Delta\sigma \gamma_M} \right)^m. \quad (7)$$

За умови врахування спектра навантаження із десяти регулярних циклів відповідно до Норм (табл. 1), довговічність  $N_{\text{спек}}$  визначається шляхом лінійного підсумовування пошкоджуваності (метод Пальмгрен–Майнера):

$$\sum_{j=1}^{10} \frac{n_j}{N_j} \leq 1, \quad (8)$$

де  $n_j$  – кількість  $j$ -циклів з розмахом  $\Delta\sigma_j$ ;  $N_j$  – гранична довговічність при регулярному навантаженні з розмахом  $\Delta\sigma_j$  для  $j$  елемента спектру. Значення  $N_j$  визначається за формулою:

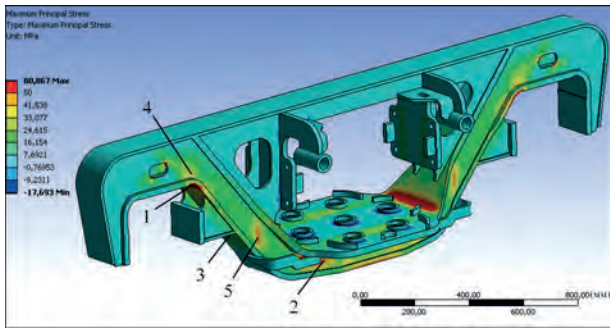


Рис. 2. Розподіл головних напружень в конструкції зварної бічної рами під дією регламентованих Нормами [6] навантажень (опис 1–5 див. у табл. 2)

$$N_j = C \left( \frac{FAT}{\Delta \sigma_j \gamma_M} \right)^m.$$

(9)

У табл. 2 узагальнено допустимі амплітуди напружень (втомна міцність) відповідно до Норм [6] та рекомендацій МІЗ [7] у різних зонах зварної конструкції бічної рами з урахуванням зазначеного [6] спектра навантажень на базі  $10^7$  циклів під час тривалої експлуатації. Порівняння показує недостатній консерватизм Норм при оцінці втомної міцності зварних з'єднань.

Також у табл. 2 представлено розраховані значення максимальних напружень в різних зонах бічної рами внаслідок дії максимальних проектних зусиль на візок із осьовим навантаженням 23,5 тс. Проведені розрахунки (табл. 2, поз. 2, 4) показують, що для забезпечення достатнього рівня втомної міцності у найбільш небезпечних зонах зварної конструкції бічної рами доцільно застосовувати загальну термічну обробку для релаксації залишкових напружень та ударну ультразвукову обробку вздовж лінії сплавлення поздовжніх кутових зварних з'єднань.

Важливо, що розробка конструкції зварної бічної рами проводилась також з урахуванням тех-

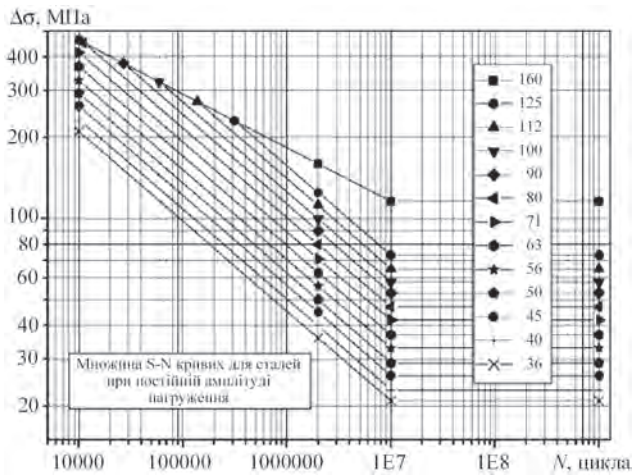


Рис. 3. Узагальнені криві Веллера для різних класів *FAT* зварних з'єднань (матеріал – сталь) для нормальних номінальних напружень при  $N < 10^9$  циклів [7]

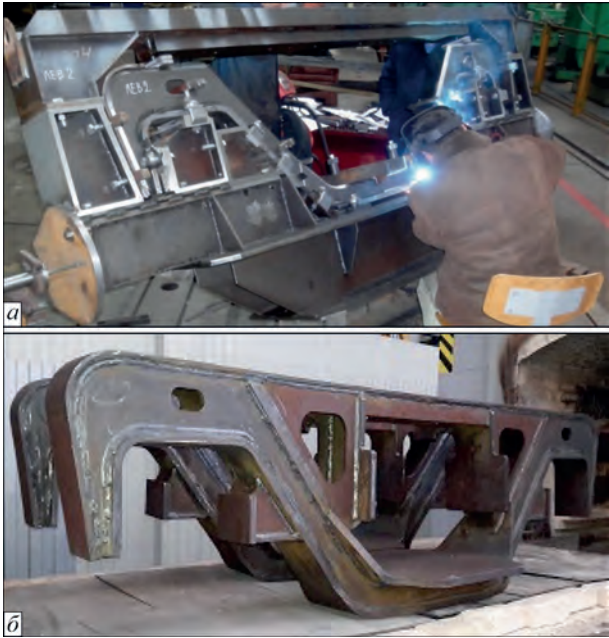


Рис. 4. Оснащення для збирання та зварювання конструкції бічної рами (а) і два виготовлених дослідних зразка (б)

Таблиця 2. Порівняння амплітуд напружень, що допускаються, і розрахункових максимальних напружень в різних зонах конструкції бічної рами відповідно до чинних Норм [6] і Рекомендацій МІЗ [7]

Зона конструкції бічної рами	Норми [6]		МІЗ [7]	Розрахунок/вимірювання
	Коефіцієнт зниження границі витривалості $K_\sigma$	Максимально допустима амплітуда напружень $\max(\sigma_a)$ , МПа	Допустима амплітуда напружень $[\sigma_a]$ , МПа ( $\gamma_M = 1,0/1,4$ )	Максимальне значення головних напружень $\sigma_a$ , МПа
1. Основний матеріал в зоні R55 буксового отвору	1,5	150	-	81
2. Поздовжнє кутове зварне з'єднання бічної стінки і опорної поверхні пружин	3,0	78	40/50	56/63
3. Поперечне кутове зварне з'єднання опори в буксовому отворі	3,0	78	40/50	37
4. Поздовжнє кутове з'єднання в зоні R55 буксового отвору	3,0	78	40/50	53/37
5. Поперечне стикове зварне з'єднання бічної стінки	4,7	51	44/56	33





Рис. 5. Дослідний зразок № 1 суцільнозварної бічної рами під час прискорених випробувань на втому (а) та руйнування в зоні поперечного зварного з'єднання бічної стінки (б), злам в зоні першої тріщини (в) і в зоні руйнування (г)

нологічних можливостей складання та зварювання всіх деталей із забезпеченням високих вимог щодо якості та несучої здатності виробу. З цією метою використовували мінімальну кількість зварних з'єднань, особливо поперечних і розташували їх в найменш навантажених зонах, забезпечення повного проплавлення всіх зварних з'єднань, по можливості виконання двостороннього зварювання з обробленням кромки. Було розроблено технологічну інструкцію збирання та зварювання бічної рами, а також, відповідне, спеціалізоване оснащення, яке забезпечує точність збирання елементів конструкції та низький рівень залишкових деформацій, виконання зварювання з високою якістю, додаткову обробку та неруйнівний контроль найбільш небезпечних ділянок зварних з'єднань, зменшення загальних трудових затрат та часу на виготовлення виробу.

Виготовлено два дослідних зразки (рис. 4) та проведено прискорені випробування на втому (рис. 5) за вимогами діючих в Україні стандартів [9].

Результати випробувань на втому показали, що в зразку зварної бічної рами № 1 після  $N_{i,mp} = 8,8$  млн циклів вертикального навантаження (амплітуда  $P_{ai} = 245$  кН = 25 тс, постійне середнє навантаження циклу  $P_m = 363$  кН = 37 тс) утворилась перша макротріщина в основному металі на боковій стін-

ці між нижнім поясом і опорною поверхнею пружин. Під час продовження регулярних навантажень тріщина повільно розвивалася у нижньому поясі та фактично не розвивалася на опорній поверхні пружин. При 11,6 млн циклів в зоні поперечного зварного з'єднання бокової стінки утворилась друга макротріщина, яка і призвела до руйнування при  $N_{i,p} = 13$  млн циклів (рис. 5, б). Проведено розкриття обох тріщин. Візуальний аналіз поверхні першої тріщини не виявив дефектів зварювання, всі зварні з'єднання виконано з повним проплавленням (рис. 5, в). Також аналіз виявив, що друга тріщина утворилась внаслідок дефекту несучільності, а саме неповного проплавлення поперечного зварного з'єднання (рис. 5, г). В зразку № 2 після  $N_{i,mp} = 5,0$  млн циклів утворилась макротріщина в буксовому проїмі в зоні радіусного переходу R55, після  $N_{i,p} = 5,4$  млн циклів відбулось руйнування. Візуальний аналіз зламу, виявив, що тріщина утворилась в зоні повздовжнього кутового зварного з'єднання, але дефектів зварювання не виявлено (рис. 6).

Взагалі, циклічна довговічність двох дослідних зразків зварної бічної рами у 2...4 рази перевищувала циклічну довговічність литих рам, навіть зміцнених технологією ВМП, при такому ж режимі навантаження. При цьому встановлена довговіч-



Рис. 6. Фрагмент руйнування дослідного зразка № 2 суцільнозварної бічної рами після утворення макротріщини під час прискорених випробувань на втому (а) та після руйнування в зоні радіусного переходу R55 буксового отвору (б, в)

ність зварних рам в десятки разів перевищує розрахункове допустиме число циклів до руйнування, яке для навантаження  $37 \pm 25$  тс для литих рам складає  $[N_p] = 0,345 \cdot 10^6$  (за даними досліджень, проведених УкрНДІ «Вагонобудування», м. Кременчук). Слід відмітити, що зразок зварної бічної рами № 1 показав високе значення відносної живучості  $J = (N_{i,p} - N_{i,mp}) / N_{i,p} = 0,32$ , а за абсолютною величиною живучість зварного зразка перевищує у кілька разів довговічність стандартної литої рами (без додаткових зміцнюючих обробок).

Таким чином, експериментально підтверджено високі показники опору втомі розробленої в ІЕЗ ім. Є.О. Патона конструкції суцільнозварної бічної рами візка вантажного вагону з осьовим навантаженням 23,5 тс, що дає підстави рекомендувати дану конструкцію до впровадження на залізницях колії 1520 мм.

## Висновки

1. Проведено розрахунок опору втомі розробленої в ІЕЗ ім. Є.О. Патона конструкції суцільнозварної бічної рами з листового прокату (сталь 09Г2С) візка вантажного вагону з осьовим навантаженням 23,5 тс з урахуванням заданого спектру навантаження. За критерій втомного руйнування приймали зародження втомної макротріщини. Встановлено максимально допустимі амплітуди напружень в різних зонах дослідженої рами відповідно до діючих норм в Україні та рекомендацій МІЗ. Показано, що проектування конструкцій бічної рами необхідно проводити за рекомендаціями МІЗ, оскільки вони є більш консервативними.

2. Доведено, що за допомогою розробленої технології та оснащення можливо виготовляти суцільнозварні бічні рами візка залізничного вагону із забезпеченням високої якості зварних з'єднань і геометричних форм виробів.

3. Проведено випробовування на втому двох зразків суцільнозварної бічної рами при навантаженні  $37 \pm 25$  тс. Експериментально встановлено, що циклічна довговічність зварних рам у 2...4 рази перевищувала циклічну довговічність литих

рам, навіть зміцнених технологією височастотної механічної проковки. При цьому довговічність зварних рам в десятки разів перевищує розрахунково допустиме число циклів до руйнування при заданому режимі навантаження.

4. Високі показники опору втомі розробленої в ІЕЗ ім. Є.О. Патона конструкції суцільнозварної бічної рами візка вантажного вагону з осьовим навантаженням 23,5 тс дають підстави рекомендувати дану конструкцію до впровадження на залізницях колії 1520 мм.

## Список літератури

- Будюкин А.М., Кондратенко В.Г., Погудин В.Г. (2014) Анализ причин отказа боковых рам вагонных тележек при их эксплуатации на электрифицированных участках. *Бюллетень результатов научных исследований Петербургского государственного университета путей сообщения*, 1, 177–181.
- Зарипов Р.Ю. (2015) О проблеме изломов боковых рам железнодорожных вагонов и пути ее решения. *Наука и техника Казахстана*, 3–4, 28–33.
- Пастухов И.Ф., Пастухов М.И. (2012) О влиянии литейных дефектов на сопротивление усталости литых деталей. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*, 3, 11–18.
- Махненко О.В., Сапрыкина Г.Ю., Мирзов И.В., Пустовой А.Д. (2014) Перспективы создания сварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона. *Автоматическая сварка*, 3, 36–42.
- Патон Б.Є., Підлужний В.Е. Лобанов Л.М., Махненко О.В., Павловський В.І., Пустовой А.Д., Лашко А.Д. Лашко А.А., Бучковський А.В. (2015) *Зварна бокова рама візка вантажного залізничного вагона*, Україна, Пат. 95960, МПК В61F 5/52 (2006.01).
- (1995) *Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)*. Москва, ГосНИИВ – ВНИИЖТ.
- Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. IIW Doc XIII-1965к14-03/XV-1127к14-03, Update 2006-07-10, 147 p.
- Бороненко Ю.П., Орлова А.М., Рудакова Е.А. (2005) *Проектирование ходовых частей вагонов: учеб. пособие*. Ч. 2. Проектирование рам двухосных тележек грузовых вагонов. СПб.-Петербург. гос. ун-т путей сообщения.
- (2010) *Надрессорные балки и боковые рамы литых двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методика испытаний на усталость*. Москва, «ВНИИЖТ» – «НИИ вагоностроения».

## References

- Budyukin, A.M., Kondratenko, V.G., Pogudin, V.G. (2014) Analysis of failure causes of side frames of car bogies during



- their operation on electrified tracks. *Bull. Rez. Nauchn. Issledov. PGUPS*, **1**, 177-181 [in Russian].
2. Zaripov, R. Yu. (2015) On problem of rupture of side frames of railway cars and means of its solution. *Nauka i Tekhnika Kazakhstana*, **3-4**, 28-33 [in Russian].
  3. Pastukhov, I.F., Pastukhov, M.I. (2012) On effect of cast defects on fatigue resistance of cast parts. *Vestnik Gomelskogo GTU*, **3**, 11-18 [in Russian].
  4. Makhnenko, O.V., Saprykina, G. Yu., Mirzov, I.V., Pustovoj, A.D. (2014) Prospects for development of load-carrying elements of freight car bogie. *The Paton Welding J.*, **3**, 33-38.
  5. Paton, B.E., Pidluzhny, V.E., Lobanov, L.M., Makhnenko, O.V. et al. (2015) *Welded bogie side frame of railway freight car*. Ukraine Pat. 95960, Int. Cl. B61F 5/52 (2006.01) [in Ukrainian].
  6. (1995) *Norms for calculation and design of railway cars of MPS of 1520 mm track (non-self-propelled)*. Moscow, GosNIIV – VNIIZhT [in Russian].
  7. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. IIW Doc. XIII-1965k14-03/XV-1127k14-03. Update 2006-07-10.
  8. Boronenko, Yu.P., Orlova, A.M., Rudakova, E.A. (2005) *Design of running gears: Manual*. Pt 2: Design of frames of two-axle bogies of freight cars. St.-Petersburg, PGUPS [in Russian].
  9. (2010) *Truck bolsters and side frames of cast two-axle bogies of freight cars of 1520 mm track, fatigue testing procedure*. Moscow, VNIIZhT – NII Vagonostroeniya [in Russian].

## DEVELOPMENT OF WELDED STRUCTURE OF SIDE FRAME OF FREIGHT CAR TRUCK OF INCREASED RELIABILITY

L.M. Lobanov, O.V. Makhnenko, V.V. Knysh, S.A. Solovej, V.I. Pavlovskyi

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Accidents occurring on railway track of 1520 mm are often associated with the fracture of cast load-carrying elements of three-element freight car trucks. The level of quality and endurance of such truck elements as side frame and truck bolster, which are traditionally manufactured by casting technology, are insufficient, so it is advisable to use welding technology to manufacture the mentioned parts of sheet rolled metal in order to increase the fatigue resistance characteristics. The development of a new all-welded structure of side frame of a three-element freight car truck with an axial load of 23.5 tc was carried out on the basis of widespread use of mathematical modelling to determine the stress-strain state of welded elements of the truck under the action of a regulated range of loads and to evaluate the strength according to the valid standards and modern global approaches. The technology of assembly and welding, as well as the appropriate specialized equipment for manufacture of a developed design of welded side frame were created. Two test specimens were manufactured and accelerated fatigue tests were carried out, the results of which showed a significant increase in endurance and vitality under operational cyclic loads as compared to designs of existing cast side frames. Taking into account high values of reliability, availability and manufacturability, ability of a significant reduction in unsprung weight and increase in dimensional accuracy, the welded structure of the side frame of a three-element freight car truck is very promising for its implementation on railway track of 1520 mm. 9 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

**Keywords:** freight car truck, side frame, welded structure, technology of production, fatigue resistance, endurance, vitality, mathematical modelling, calculation, fatigue testing

Надійшла до редакції 11.02.2020

### X МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах»

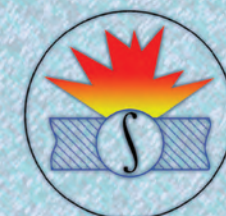
Україна, Одеса, готель «Аркадія»  
14 – 18 вересня 2020 р.



Національна академія наук України  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 червня 2020 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць дев'яти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті:  
<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>



#### Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.06.2020 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 17.07.2020 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 15.09.2020 р.

#### Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
вул. Казимира Малевича 11  
м. Київ, 03150, Україна  
тел. / факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
<http://pwi-scientists.com/ukr/mmi2020>

## ЗВАРЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ УРАЇНИ

А.К. Царюк<sup>1</sup>, Є.В. Левченко<sup>2</sup>, М.М. Гришин<sup>2</sup>, А.В. Вавілов<sup>2</sup>, А.Г. Кантор<sup>2</sup>, А.І. Бивалькевич<sup>3</sup><sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)<sup>2</sup>АТ «Турбоатом». 61037, м. Харків, просп. Московський, 199. E-mail: [office@turboatom.com.ua](mailto:office@turboatom.com.ua)<sup>3</sup>ВП «Атомремонтсервіс», 07100, м. Славутич, просп. Ентузіастів, 7. E-mail: [kanc@ars.atom.gov.ua](mailto:kanc@ars.atom.gov.ua)

Наведено огляд окремих робіт ІЕЗ ім. Є.О. Патона зі створення прогресивних технологій зварювання устаткування для підприємств енергетичного сектору України. Охарактеризовано підходи до одержання зварних роторних конструкцій, комбінованих з'єднань високотемпературних компонентів устаткування теплових станцій. Узагальнено інформацію щодо удосконалення технології зварювання товстостінних трубних елементів зі сталі 10ГН2МФА для АЕС. Накопичений досвід створює основу для вирішення нових задач в енергетичному секторі країни. Бібліогр. 12, табл. 3, рис. 9.

*Ключові слова:* зварні ротори, автоматичне зварювання під флюсом, вузький зазор, комбіновані з'єднання, ручне дугове зварювання, з'єднання парогенератора з головним циркуляційним трубопроводом, автоматичне аргонодугове зварювання

Започаткований у 1959 р. підрозділ ІЕЗ ім. Є.О. Патона «Фізична та конструктивна міцність зварних з'єднань із сталей підвищеної міцності» займався фундаментальними і прикладними дослідженнями, націленими на вирішення актуальних питань з забезпечення якості і надійності зварних відповідальних конструкцій зі складнолегованих сталей у важкому, енергетичному та атомному машинобудуванні. Для сьогодення цей напрям залишається одним з головних і актуальних для енергомашинобудівних та енерговиробляючих підприємств.

За більш ніж 50 років відділ провів численні роботи, вирішуючи досить складні, неординарні наукові і виробничі проблеми. Науково-дослідна діяльність включала вивчення фізико-металургійних засад зварюваності і технологічної міцності складнолегованих сталей різних структурних класів, розробку ефективних технологічних процесів ручного і автоматичного зварювання в захисних газах і під флюсом, створення і дослідження зварювальних матеріалів, розробку і удосконалення технологій ремонтного зварювання устаткування і трубопроводів теплових і атомних станцій.

У якості прикладів надана інформація про окремі роботи, виконані відділом у співпраці з організаціями-партнерами, що мали певне актуальне значення для промислових підприємств.

**Автоматичне зварювання товстостінних турбінних роторних конструкцій.** Актуальне для промисловості підвищення потужності і робочих параметрів енергетичного устаткування обумовлює збільшення габаритів і маси його деталей. Однак при виготовленні відливок і поковок роторів великих розмірів виникають проблеми з забезпеченням якості, особливо при використанні легованих сталей [1].

Перші зварні ротори турбін у колишньому СРСР виготовляли з застосуванням ручного дугового зварювання. Але цей метод, незважаючи на

його гнучкість і простоту, відрізняється низькою продуктивністю, що особливо виявлялось при зварюванні елементів великої товщини.

На зміну ручному процесу зварювання у 1967–1968 рр., вперше у практиці енергомашинобудування у СРСР, на Харківському турбінному заводі (колишня назва АТ «Турбоатом») за участю фахівців ІЕЗ ім. Є.О. Патона було впроваджено технологію автоматичного зварювання під флюсом роторів парових і газових турбін з використанням окремих елементів – дисків. Важливими перевагами такого заходу є спрощення виготовлення складових елементів при забезпеченні їх належної якості, зменшення маси готової конструкції, можливість сполучення у одному великому виробі різних за легуванням сталей відповідно до різних термічних умов роботи окремих частин цього виробу [1].

При відпрацюванні технології на дослідній базі Харківського турбінного заводу за участю ІЕЗ ім. Є.О. Патона проведено перші дослідно-промислові роботи при використанні кілець з  $D_{\text{зовн}} = 1000$  мм і товщиною 100 мм зі сталі 35ХМ; також виготовлено модель ротора з цієї сталі з  $D_{\text{зовн}} = 1200$  мм з розробкою під зварювання глибиною 200 мм (рис. 1). При зварюванні використовували сполучення флюс/зварювальний дріт: АН-22+Св-10ХМ, АН-22+Св-08ХГМСФ та АН-17М+Св-08ХГМСФ. Одним з важливих результатів було встановлення характеру розвитку деформацій у товстостінному з'єднанні і визначено умови їх мінімізації.

Після ретельного проведення досліджень механічних властивостей, контролю якості зварних з'єднань технологія була застосована при виготовленні штатних роторів типу ГТ-35, К-160, ПВК-150, К-22-44, К-500-65. На цьому етапі використовували автомат У-738 з механічним (за допомогою копіру) керуванням зварювального мундштука.

Царюк А. К. – <https://orcid.org/0000-0002-5762-5584>, Бивалькевич А.І. – <https://orcid.org/0000-0002-9261-3642>

© А.К. Царюк, Є.В. Левченко, М.М. Гришин, А.В. Вавілов, А.Г. Кантор, А.І. Бивалькевич, 2020



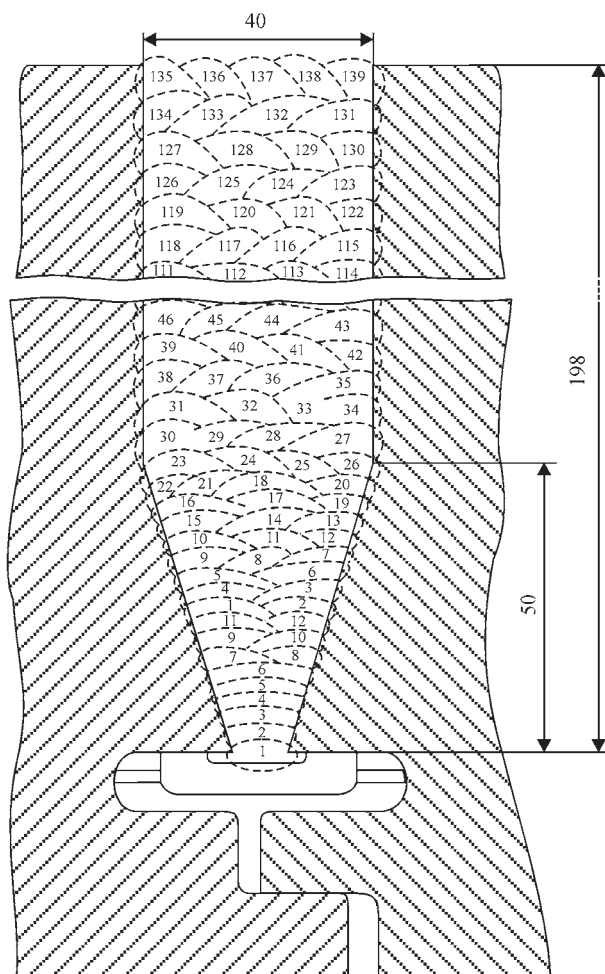


Рис. 1. Схема автоматичного зварювання моделі ротора

Вперше апробована промислова технологія дозволяла проводити зварювання у автоматичному режимі горизонтально розташованих роторів діаметром більш 500 мм з товщиною стінки від 30 до 250 мм і масою до 36 т. Продуктивність процесу зварювання одного ротора, у порівнянні з ручним зварюванням, збільшилась у 4...5 разів, середня тривалість виготовлення одного ротора становила 3...5 діб.

В подальшому розпочався випуск потужних роторів масою до 200 т, виготовлених з використанням кованих дисків зі сталей 25Х2НМФА та 20ХН2МФА, які поєднують належну міцність, високу пластичність і низьку критичну температуру крихкості [2, 3].

На зміну першій моделі зварювального апарату за участю ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено нові модифікації автоматів для автоматичного зварювання під флюсом кільцевих секцій потужних роторів турбін з автоматичною розкладкою валиків за заданою програмою [3].

Слід відзначити, що для усунення недоліків, характерних для зварювання з традиційною широкою розробкою кромки, впроваджено прогресивне зварювання у вузький зазор, що дозволило [3–5]:

- зменшити трудомісткість виготовлення конструкцій з великою товщиною зварюваних елементів і поліпшити умови праці, виключивши втручання у зварювальний процес оператора-зварника;

- отримати економію зварювальних матеріалів та електроенергії;

- зменшити об'єм металу, що наплавляється;

- знизити рівень залишкових напружень у зварних з'єднаннях та ймовірність утворення тріщин при відпуску після зварювання.

Зазначимо, що у порівнянні з електрошлаковим зварюванням (ЕШЗ), яке використовують для виготовлення виробів великої товщини, автоматичне зварювання під флюсом також має значні переваги внаслідок спрощення технології. При зварюванні під флюсом можливе використання значно менших за шириною розробок (для порівняння – для вказаної вище товщини металу 500 мм при ЕШЗ ширина розробки становила 90 мм) і приводиться лише один вид термічної обробки – відпуск; після ЕШЗ легованих сталей вимагається застосування складної термічної обробки – подвійної нормалізації при високій температурі (950 °С) з послідовним відпуском [3].

При зварюванні під флюсом ширина розкриття кромки визначається як можливістю розміщення зварювального мундштука всередині зазору без ризику закорочення наконечника на кромку, так і можливістю проведення зачищення дефектних ділянок на різній глибині з'єднання з використанням металообробного інструменту. Встановлено, що для товщини до 500 мм ремонтні операції зручно виконувати ручним інструментом при ширині зазору не менше 36 мм; при зазорі 24...28 мм вибирання дефектних місць можливе тільки при використанні верстатного обладнання [5].

Експериментально визначено, що якісне сплавлення валиків і основного металу можливе як при зварюванні у два, так і у три валики в шарі. Випробуваннями техніки зварювання за обома варіантами з різною шириною розкриття кромки встановлено, що оптимальна ширина при зварюванні двома валиками становить в середньому 25 мм, трьома – може бути 30...36 мм (рис. 2).

Між тим при зварюванні у вузький зазор виникали ускладнення з видаленням шлаків і формуванням шва. На основі порівняльного аналізу різних марок зварювальних матеріалів встановлено, що найкраща віддільність шлаку у глибокій розробці і мінімальний вміст шкідливих домішок (S, P – до рівня приблизно 0,03 ваг. % кожного) досягаються при використанні флюсів АН-17М, АН-43 у сполученні з дротом Св-08ХН2ГМЮ. Для уникнення заклинювання шлакової кірки, якісного сплавлення валиків між собою і з основним ме-

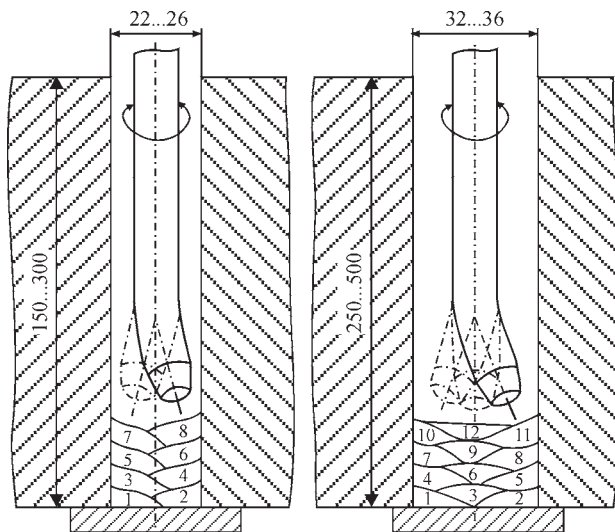


Рис. 2. Приклади розташування валиків за відпрацьованої технологією зварювання у вузький зазор

талом, запобігання утворення підрізів і вкраплень шлаку уздовж шва всередині розробки розроблено вимоги щодо параметрів режиму зварювання, ширини валиків і позиціонування зварювального дроту (діаметром 2 і 3 мм) відносно стінок розробки.

Для усунення ризику утворення холодних тріщин зварювання проводять з попереднім/супутнім підігрівом приблизно до 350 °С. Після зварювання застосовують високий відпуск (630 °С) для зниження рівня залишкових напружень і одержання структурного стану, що забезпечує необхідні експлуатаційні властивості. Застосування визначених технологічних заходів забезпечує легку (самостійну)

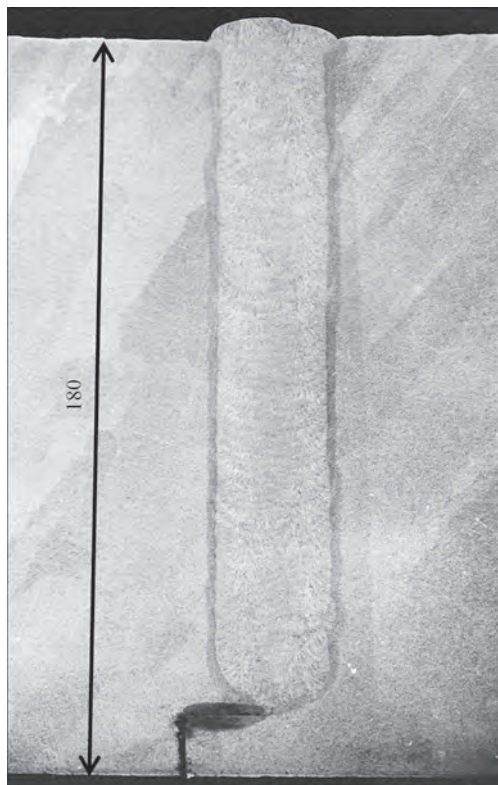


Рис. 3. Переріз модельного з'єднання роторної секції зі сталі 25X2NMFA парової турбіни К-1000 потужністю 1000 МВт



Рис. 4. Зварювання ротора на спеціалізованому стенді на АТ «Турбоатом»

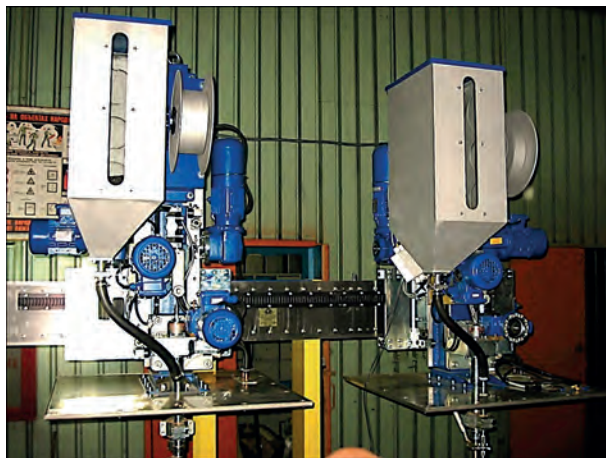


Рис. 5. Загальний вигляд здвоєних зварювальних автоматів А1569М для автоматичного зварювання під флюсом у вузький зазор циліндричних виробів

віддільність шлаку з розробки впродовж всього циклу безперервного зварювання і одержання щільних, бездефектних швів (рис. 3).

Для зварювання роторних конструкцій використовується спеціалізований унікальний стенд, де здійснюється складання, закріплення частин ротора і попередній/супутній підігрів (рис. 4). На сучасному етапі впроваджено зварювальні автомати нової конструкції А1569М (виготовлення ОЗСО ІЕЗ ім. Є.О. Патона) з процесорним керуванням положення поворотного мундштука (рис. 5) [2].

Суттєвим досягненням в останні роки стало опанування на АТ «Турбоатом» за участю ІЕЗ ім. Є.О. Патона технології виготовлення зварних композитних великогабаритних роторів [6, 7]. У їх конструкції передбачено використання елементів з двох марок сталей – 25X2NMFA та 20X3BMFA – кожний з яких працює у різних температурних умовах. Комбінований ротор нового покоління показано на рис. 6.

**Удосконалення (реконструкція) високо-температурних компонентів котлотурбінного устаткування.** Однією з актуальних задач у енергетичному секторі є удосконалення конструкції окремих елементів для підвищення надій-



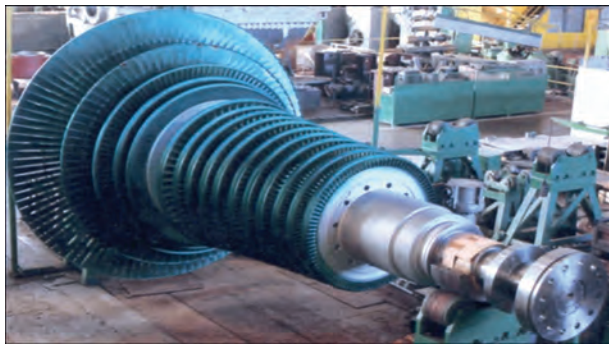


Рис. 6. Композитний ротор зі змонтованими лопатками циліндру середнього тиску парової турбіни нового покоління потужністю 325 МВт (АТ «Турбоатом»)

ності устаткування в цілому. На основі досвіду експлуатації турбінного обладнання і розрахунків за методом кінцевих елементів фахівцями АТ «Турбоатом» показано, що критичними вузлами у проточних частинах парових турбін є зварні шви у з'єднаннях лопаток зі сталі 15X12ВНМФ та 15X11МФ з ободом і тілом зі сталі 15X1М1Ф високотемпературних діафрагм. Традиційно зварювання таких з'єднань виконували електродами, що давали низьколегований наплавлений метал (типу 09X1МФ). Прийнято рішення щодо підвищення експлуатаційних властивостей швів за рахунок застосування електродного металу з підвищеним вмістом хрому. З залученням фахівців ІЕЗ ім. Є.О. Патона обрано електроди, що забезпечували наплавлений метал типу 0,16С–Cr11–W0,5Ni0,5Mo0,9V0,2. Проведено комплекс досліджень з оптимізації теплового режиму зварювання для забезпечення високої технологічної міцності зварних з'єднань [8]. Вирішено питання щодо високого відпуску результатуючих зварних з'єднань, що забезпечило необхідний рівень ударної в'язкості металу швів ( $KCV \geq 44$  Дж/см<sup>2</sup>) при їх міцності вище основного металу (табл. 1). Технологія впроваджена на АТ «Турбоатом» при виготовленні високотемпературних діафрагм турбін (рис. 7).

Вкрай актуальною є докорінна модернізація об'єктів теплової енергетики України [9] із застосуванням нових сталей з підвищеним рівнем тривалої міцності. Між тим [10], на початковому стані планом реконструкції та модернізації ТЕС і ТЕЦ в енергогенеруючих компаніях у період до 2020 р. передбачалась лише реконструкція існуючих енергоблоків з подовженням терміну їх роботи на 15...20 років. Відповідно з вказаними планами АТ «Турбоатом» разом з ІЕЗ ім. Є.О. Патона проведено роботи з розробки технології зварювання паропроводу з нової мартенситної високо-

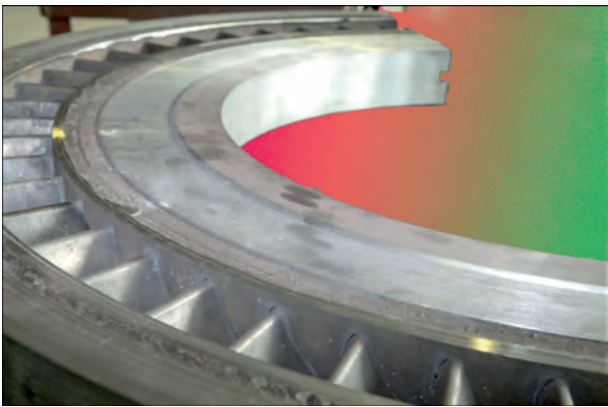


Рис. 7. Елемент зварної високотемпературної діафрагми парової турбіни (АТ «Турбоатом»)

хромистої сталі X10CrMoVNb91 (P91) з корпусом парової турбіни зі сталі 15X2М2ФБС (П3) [11]. Досліджено можливість зварювання електродами з низько- та високохромистим наплавленим металом – 2 та 9 % Cr (систем легування 0,07С–Cr2–Mo1–V0,2 та 0,1С–Cr9–Mo1–Ni0,8VNb). Дослідним шляхом визначено температуру попереднього (супутнього) підігріву для запобігання сповільненого руйнування таких комбінованих з'єднань і режим їх післязварювального відпуску. В обох заходах зварювання метал швів перевищував мінімість основного металу – руйнування поперечних зразків при кімнатній і робочій температурах відбувалось по основному металу; рівень в'язкості швів відповідав необхідній умові  $KCV \geq 51$  Дж/см<sup>2</sup> (табл. 2). Технологія прийнята для промислового застосування.

**Зварювання елементів ГЦТ Ду850 ядерних енергоблоків.** Однією з технологічних задач було удосконалення технології приварювання парогенератора до головного циркуляційного трубопровода (ГЦТ) в монтажних умовах. Елементи, що зварюються, – патрубок парогенератора та ГЦТ – виготовлені зі сталі 10ГН2МФА, плакованої всередині аустенітним корозійностійким шаром; внутрішній діаметр становить 850 мм, товщина стінки 70 мм. При зварюванні основного (несучого) шва існуючою технологією рекомендовано застосування аргондоугового процесу (ААрДЗ) з дротом Св-08Г1НМА та стандартної розробки кромки з їх широким розкриттям (рис. 8, а). Проте передбачалось, що більш продуктивним може бути автоматизоване зварювання у вузьку розробку; перевагами такого заходу, крім значного зменшення трудомісткості робіт, є зменшення кількості наплавленого металу, зниження рівня залишкових напружень і, що суттєво, зменшення дози радіаційного впливу на персонал. Такий підхід став

Таблиця 1. Механічні властивості зварних з'єднань типу 15X1М1Ф+15X12ВНМФ (в стані після високого відпуску при 720 °С)

$T_{\text{выпр}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	$KCV, \text{Дж/см}^2$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\Psi, \%$	Місце руйнування
	Метал шва					Зварне з'єднання		
20	555,75	704,2	22,75	56,45	93	561,65	53,1	ЗТВ
570	319,65	388,3	29,75	82,5	190,7	375,65	67,9	ЗТВ

Таблиця 2. Механічні властивості комбінованих з'єднань типу ПЗ+Р91 (стан після високого відпуску)

Тип металу шва	$T_{\text{випр.}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	Місце руйнування
		Метал шва					Зварне з'єднання	
9 % Cr	20	601,8	727,2	18,5	52,5	96,3	615,6	ЗТВ
	570	361,4	401,0	22,5	81,3	-	360,3	ЗТВ
2 % Cr	20	620,1	716,7	20,4	68,7	193,9	667,8	ЗТВ
	570	410,6	451,0	20,5	80,5	-	390,0	ЗТВ

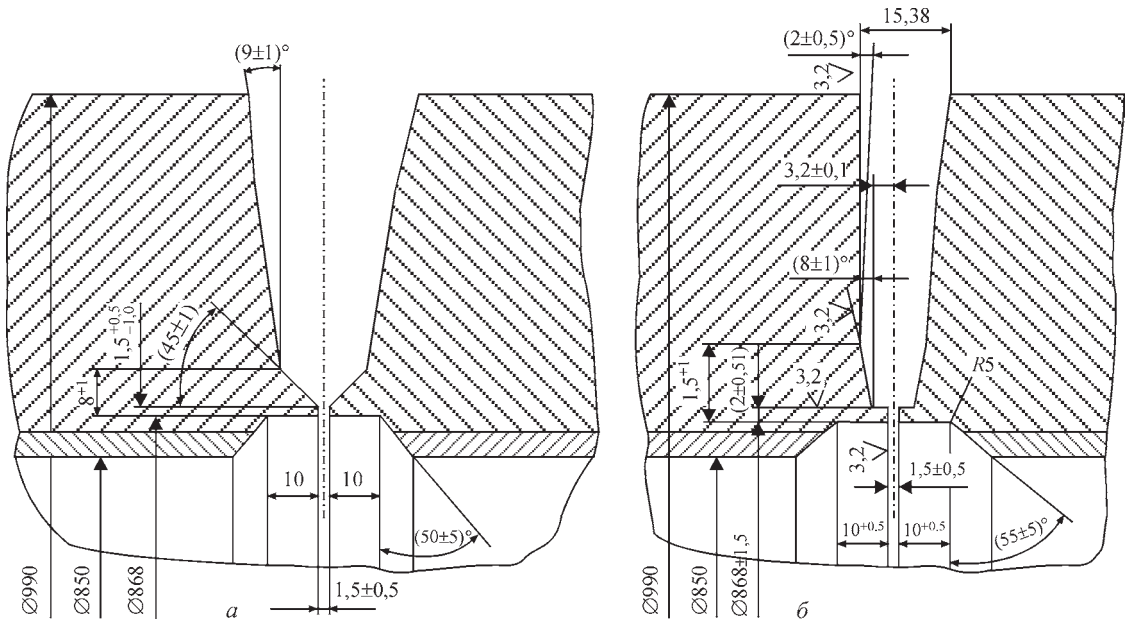


Рис. 8. Розробки крайок : а – стандартна; б – запропонована

можливим завдяки розробці спеціалізованого портативного механообробного устаткування, яке дозволило підготувати на елементах, що стикаються, розробки крайок з вузьким розкриттям (рис. 8, б) [12]. Для одержання стикових з'єднань прийнято апаратуру Autotig 600 PC (фірми «Polysoude», Франція) для ААрДЗ у вузьку розробку кромки у суміші 70 % He + 30 % Ar. Роботи з дослідної перевірки і опанування технології виконано фахівцями ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ОП «Атомремонтсервіс».

Проведена ретельна перевірка нової технології [9] за регламентом, визначеним правилами і нормами у атомній енергетиці, оскільки зварювання у вузьку розробку нормативними документами не було передбачене. Попередніми дослідженнями відпрацьована технологія зварювання у горизонтальному положенні стиків дротом Св-08Г1НМА діаметром 0,9 мм і визначено оптимальні параметри режиму ( $I_{\text{зв}} = 150 \text{ А}$ ,  $U_{\text{д}} = 11 \text{ В}$ ,  $v_{\text{зв}} = 6,0 \text{ м/год.}$ , швидкість подачі дроту  $v_{\text{др}} = 152,0 \text{ м/год.}$ , витрати газової суміші 1000...1200 л/год.; попередній/супутній підігрів близько 170 °С). Після заповнення основного шва проводили наплавлення вибраного плакованого шару та неруйнівний контроль всього з'єднання.

Таблиця 3. Механічні властивості металу шва зварного з'єднання сталі 10ГН2МФА (результати дослідницької атестації)

$T_{\text{випр.}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	$KCV, \text{ Дж/см}^2$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	Місце руйнування
	Метал шва					Зварне з'єднання	
20	615,0	690,0	24,2	73,3	290,0	556,0	ОМ
350	522,0	617,0	22,0	70,8	240,0	505,0	ОМ

Далі виконували високий відпуск за штатним режимом (при 650 °С) і повторний неруйнівний контроль як основного шва, так і зони плакування. Підтверджено належну якість та відсутність дефектів у зварному з'єднанні. Результуючі механічні властивості металу несучого шва при кімнатній і робочій температурах перевищували встановлені вимоги.

За розробленими рекомендаціями проведена дослідницька атестація технології у лабораторних умовах ВП «Атомремонтсервіс» шляхом зварювання і випробування кільцевого з'єднання діаметром 990 мм і товщиною 70 мм, чим була підтверджена придатність запропонованої технології для подальшої виробничої атестації. Характерні механічні властивості наведено у табл. 3. Критична температура крихкості становила –70 °С, структура металу шва – бейніт відпуску з твердістю  $HV = 235...240$ .

Остаточні атестаційні випробування технології виконано на Південно-Українській АЕС (див. переріз шва на рис. 9). Після одержання позитивних результатів всіх контрольних перевірок нова технологія була узгоджена з Державним комітетом по ядерному регулюванню України і рекомендована для застосування при ремонті ГЦТ Ду 850, а та-



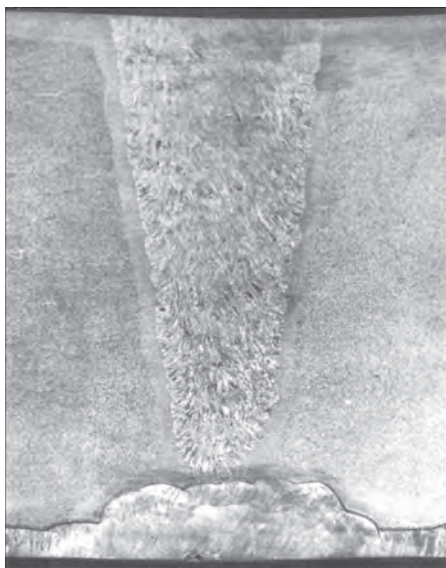


Рис. 9. Переріз атестаційного з'єднання зі сталі 10ГН2МФА, виконаного на Південно-Українській АЕС

кож для з'єднання елементів ГЦТ з патрубками парогенератора ПГВ-1000М при його заміні на енергоблоках АЕС з реакторами ВВЕР-1000.

На закінчення відмітимо, що крім загально-теоретичних досліджень відповідно до профілю діяльності Інституту, головною націленістю фахівців у роботі є прикладні наукові розробки, обумовлені потребами промислового сектору. Як видно з наведених прикладів, тільки співпраця науки та виробництва дає можливість одержати значимі результати. Накопичений таким чином досвід створює основи для вирішення нових задач, що можна узагальнити так: надбання минулого – запорука розвитку у майбутньому.

### Список літератури / References

1. Zemzin, V.N., Frenkel, L.D. (1962) *Welded structures of steam and gas turbines*. Moscow, Leningrad, Mashgiz [in Russian].  
Земзин В. Н., Френкель Л. Д. (1962) *Сварные конструкции паровых и газовых турбин*. Москва, Ленинград, Машгиз.
2. Morachkovskiy, O.K., Dmitrik, V.V., Usatyi, O.P. et al. (2018) *Development of rotors of high power turbines*. Kharkiv, FOP Panov A.M. [in Ukrainian].  
Морачковський О.К., Дмитрик В.В., Усатий О.П. та ін. (2018) *Створення роторів турбін великої потужності*. Харків, ФОП Панов А.М.
3. German, S.I., Tsaryuk, A.K., Dneprovsky, G.V. et al. (1980) *Automatic narrow-gap submerged-arc welding of alloyed steels*. St.-Petersburg, Energomashinostroenie [in Russian].  
Герман С.И., Царюк А.К., Днепровский Г.В. и др. (1980) *Автоматическая сварка под слоем флюса легированных сталей в узкую разделку*. С.-Петербург, Энергомашиностроение.
4. Tsaryuk, A.K., Kasatkin, B.S., Ivanenko, V.D. et al. (1980) *Mechanized narrow-gap submerged-arc welding of thick metal*. *Avtomatich. Svarka*, **10**, 47-51 [in Russian].  
Царюк А.К., Касаткин Б.С., Иваненко В.Д. и др. (1980) *Механизированная сварка под флюсом толстого металла в узкий зазор*. *Автоматическая сварка*, **10**, 47–51.
5. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I. (2016) *Mechanized narrow-gap submerged-arc welding of thick-walled cylindrical products*. In: *Proc. of Medovar Memorial Symposium (7-10 June 2016, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, Elmet-Roll, 82-90.
6. Subotin, V.G., Levchenko, E.V., Shvetsov, V.L. et al. (2009) *Development of new generation steam turbines of 325 MW power*. Kharkiv, Folio [in Ukrainian].
7. Tsaryuk, A.K., Moravetsky, S.I., Skulsky, V.Yu. et al. (2012) *Development of forge-welded combined medium-pressure rotor for 325 MW steam turbine*. *The Paton Welding J.*, **8**, 36-41.
8. Skulsky, V.Yu., Nimko, M.A., Tsaryuk, A.K. et al. (2018) *Welding and heat treatment of joints of steels 15Kh1M-1F+15Kh12VMNF*. In: *Coll. of Poster Papers of Int. Conf. on Welding and Related Technologies – Present and Future (5-6 December 2018, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, PWI, 50-51.
9. Karp, I.M., Smikhula, A.V. (2016) *The draft concept on modernization of thermal energy of Ukraine*. In: *Proc. of 12 Int. Sci. Conf. on Coal Power System: Ways for Reconstruction and Development (21-24 September 2016, Kyiv, NANU)*, 3-7.
10. Volchyn, I.A., Dunaevska, N.I., Gaporych, L.S. (2013) *Prospects of implementation of clean coal technologies in power engineering of Ukraine*. Kyiv, GNOZIS [in Ukrainian].
11. Skulsky, V.Yu., Nimko, M.A., Tsaryuk, A.K. et al. *Welding of combined joints of chromium steel Kh10CrMoVNb91 with low-alloy steel 15Kh2M2FBS*. *Ibid.*, 51.
12. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Kasperovich, I.L. et al. (2006) *Development and certification of automatic narrow-gap argon-arc welding technology of MCP Dn850 elements at NPP*. *The Paton Welding J.*, **5**, 19-25.

### WELDING IN THE POWER ENGINEERING BRANCH OF UKRAINE

A.K. Tsaryuk<sup>1</sup>, E.V. Levchenko<sup>2</sup>, M.M. Grishin<sup>2</sup>, A.V. Vavilov<sup>2</sup>, A.G. Kantor<sup>2</sup>, A.I. Bivalkevich<sup>3</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>PJSC «Turboatom». 199, Moscow Ave., 61037, Kharkov, Ukraine. E-mail: office@turboatom.com.ua

<sup>3</sup>SS «Atomremontservis», 7, Entuziastiv Ave., 07100, Slavutich, Ukraine. E-mail: kanc@ars.atom.gov.ua

Review of the separate works of the E.O. Paton Electric Welding Institute on creation of advanced technologies of welding the equipment for the enterprises of the power engineering sector of Ukraine is presented. Approaches to producing welded rotor structures, combined joints of high-temperature components of equipment of heat power plants are described. The information on improvement of technology of welding thick-walled pipe elements from steel 10GN2MFA for NPPs is generalized. The gained experience forms the basis for solving new problems in the power engineering sector of the country. 12 Ref., 3 Tabl., 9 Fig.

**Keywords:** welding rotors, automatic submerged welding, narrow gap, combined joints, manual arc welding, connection of steam generator with main circulation pipeline, automatic argon arc welding

Надійшла до редакції  
06.02.2020

ЗВАРНІ КОНСТРУКЦІЇ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Т.М. Лабур

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

Наведено приклади сучасних легких конструкцій з алюмінію та його сплавів. Показано діапазон їх застосування у різних галузях машинобудування. Різноманітність конструкцій відображає технологічні можливості та форми реалізації унікальних властивостей цього матеріалу. Проаналізовано тенденції світового виробництва та споживання таких конструкцій. Відмічено, що поява більш досконалих сплавів із відповідним набором фізико-механічних і технологічних властивостей, а також раціональний вибір способів їх нероз’ємного з’єднання забезпечують високу якість швів і надійність зварної конструкції. Представлені приклади наглядно ілюструють той факт, що ефективність легких конструкцій визначається функціональними вимогами до виробів, зварюваністю обраного алюмінієвого сплаву та рівнем технології його з’єднання за умов мінімальних витрат і строків виготовлення. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова:* алюміній та його сплави, способи зварювання, зварні з’єднання, легкі зварні конструкції, фізико-механічні та технологічні властивості, якість швів, надійність, умови експлуатації

Вироби з алюмінію та його сплавів на даний час заповнили ринок товарів. Вони широко використовуються в багатьох галузях машинобудування, а також цивільного і промислового будівництва [1–9]. Традиційно використовуються конструкційні матеріали на алюмінієвій основі в літальних апаратах. Галуззю їх застосування є військові, пасажирські та транспортні літаки. Застосовуються вони також у виробках ракетно-космічної техніки (до 80 % за вагою). Особливий статус алюмінієві сплави мають у конструкціях наземних транспортних засобів (автомобіле- та вагонобудуванні), річковому та морському суднобудуванні. При цьому незалежно від сфери застосування зварних конструкцій використовуються єдині характеристики, які визначають їх ресурс (табл. 1).

В авіабудуванні ефективність застосування алюмінієвих сплавів загальновідома. Порівняно дешеві, відмінно оброблювані, міцні алюмінієві сплави добре зарекомендували себе в авіації минулого ХХ століття. Вони залишаються основними авіаційними конструкційними матеріалами й на сучасному етапі та в подальшій перспективі. Створення нових моделей літальних апаратів аерокосмічної техніки нерозривно пов’язане з вирішенням трьох основних проблем машинобу-

дування: зменшення ваги, зниження вартості та підвищення експлуатаційних характеристик. Зниження ваги дозволяє зменшити матеріалоємність конструкції апарату, сприяє збільшенню корисного навантаження та поліпшенню льотно-тактичних показників при скороченні матеріальних витрат на виробництво та експлуатацію [10–12]. Це сприяє пошуку альтернативних основним аерокосмічним матеріалам на алюмінієвій основі – Д16, Д19, В95 і В96, 1201, які традиційно використовуються в конструкції планера літаків цивільного флоту. Підраховано, що зниження маси цивільного літака на 1 кг дозволяє заощадити 125...165 л палива на рік, а за весь термін його експлуатації економія споживання становить 3,0...4,8 млн дол. [9]. Широкі можливості в цьому напрямку відкрив новий клас високоміцних алюмінієвих сплавів, що містять літій.

Сучасні літаки експлуатуються переважно в умовах інтенсивних та екстремальних навантажень, тому основні вимоги, які висувуються до їх матеріалів, включають повний спектр аеродинамічних умов, вплив навколишнього середовища, безпеку польоту та вартість. При польоті використовують несучі поверхні конструкції для створення у повітряному середовищі підйомної та

Таблиця 1. Характеристики, які визначають працездатність зварної конструкції

Експлуатаційні властивості	Види випробувань	Досліджувані характеристики
Здатність до деформування у холодному стані	Розтяг	Відносне подовження, рівномірне подовження
Здатність до зварювання (зварюваність)	Технологічні проби («рибій скелет», хрестоподібні зразки тощо)	Схильність до утворення гарячих тріщин, поверхня зламу
Опір розшаруванню	Розтяг у напрямку товщини	Звуження перетину зразка
Руйнування (крихке або в’язке)	Ударний вигин зразка з надрізом	Робота деформації
	Вигин зварного шва	Поверхня зламу, кут згину
	Розтяг або вигин зразків із надрізом	Температура страгування тріщини
	Випробування за механікою руйнування	$K_{IC}(K_C)$ , $\delta_{IC}(\delta_C)$ , $J$ -інтеграл

Т.М. Лабур – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>  
© Т.М. Лабур, 2020



керуючої сил, а також силова установка, яка підтримує політ літака за допомогою енергії палива, що знаходиться на борту літака.

Правильний вибір матеріалу елементів конструкції може суттєво покращити вагові та льотно-тактичні характеристики літального апарату. Особливу увагу приділяють задоволенню вимог щодо забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції при мінімальній масі, масової ефективності матеріалу, яка визначається співвідношенням питомої міцності  $\sigma_{\text{доп}}/\rho$  до вартості 1 кг матеріалу. Підвищення масової ефективності зварної конструкції залежить від досконалості напівфабрикатів і виду з'єднань її елементів, що визначається не тільки конструктивними завданнями, але й технологічними можливостями матеріалу. Проектувальники конструкцій пред'являють до матеріалу, крім зварюваності, вимоги забезпечення його зварних з'єднань високої питомої міцності та пластичності при наявності найбільшої в'язкості руйнування. Саме це дозволяє продовжувати виконувати завдання польоту при наявності пошкоджень. З огляду на зростаючу швидкість літаків і підвищення при цьому температури зовнішніх панелей, алюмінієві сплави повинні мати також високу термостійкість та стійкість до термоциклювання в умовах експлуатації. Створення орієнтаційних космічних експресів, багаторазових апаратів, космопланів пов'язане з потребою в матеріалах, які мають, поряд з хорошою зварюваністю та тепловою стійкістю, високу якість при наднизьких температурах.

Герметичні відсіки літальних апаратів є штампозварними конструкціями, які складаються з листової оболонки товщиною 1,5...3,0 мм зі звареними в стик шпангоутами та фланцями, отриманими механічною обробкою об'ємних штамповок із заданим напрямом волокна [13–16]. Деталі з поволоки застосовуються у виняткових випадках. Це пов'язано з тим, що на полицях шпангоутів, які приварюються до оболонки, та на фланцях товщина металу становить всього 2...3 мм. При несприятливому розташуванні волокна напівфабрикату ця зона може бути негерметична, що в складних умовах експлуатації може призвести до передчасного руйнування всієї конструкції. Для цих конструкцій використовують сплави:

- В96 (7075), призначений для деталей, які повинні мати високу статичну міцність;
- Д16-Т (2024) – для деталей, які повинні мати високу міцність від втоми;
- сплави спеціального призначення (7175, 7050, 7150, 7475, 2124, 2224, 2324), тобто майже всі наявні конструкційні сплави алюмінію.

Створені за останнє десятиліття нові алюмінієві сплави спільно з іншими конструкційними ма-

теріалами відкрили шлях до появи конструкцій з більш досконалішими аеродинамічними формами [17–19]. При цьому зварні конструкції не тільки легкі та міцні, але й характеризуються високою надійністю та безпекою експлуатації літальних апаратів. Сучасні моделі літаків і ракет дозволили освоїти нові тактико-технічні характеристики, які забезпечують цивільному повітряному транспорту необхідну економічність, а військовій авіації – високу ефективність. Загальна тенденція подальшої розробки таких апаратів пов'язана з освоєнням областей високих швидкостей польоту та робочих температур конструкції. У найближчій перспективі передбачається створення гіперзвукових літальних апаратів зі швидкостями польоту  $M = 5 \dots 7 \dots 10$  км/хв.

Для вирішення цих задач відпрацьовуються різні концепції. Наприклад, для створення цілнормальних конструкцій передбачається можливість подальшого підвищення якості, надійності та строку експлуатації виробу шляхом застосування нових високоміцних легких сплавів, способів зварювання, сучасної методології проектування та виготовлення зварних вузлів. Реалізація такої концепції базується на виготовленні зварних орєбренних панелей крила, які мають значну жорсткість і мінімальну питому вагу, елементів фюзеляжу, шасі та інше. Це передбачає суттєву економію металу, зниження маси конструкції при заміні механічних з'єднань зварними.

Традиційно залучені матеріали на основі алюмінію замінюють більш досконалішими за складом та властивостям. Оскільки головна задача досконалості конструкцій літаків на найближчі роки полягає в зниженні ваги, підвищенні ресурсу та витривалості при відповідних рівнях міцності, надійності та економічній ефективності, тому постійно проводяться дослідження, які дозволять розкривати нові резерви підвищення експлуатаційних характеристик, і тим самим збільшувати їх конкурентоспроможність порівняно з іншими конструкційними матеріалами.

Яскравим прикладом політики активного оновлення конструкції є літак Боїнг 777Х. Він зібрав найбільш перспективні розробки у галузі матеріалів, технологічних процесів і операцій. Для верхньої поверхні крила, де найбільш важливими показниками є характеристики статичної міцності, застосовується високоміцний алюмінієвий сплав, розроблений фірмами «Боїнг» та «Алкоа» – сплав 7055-Т77 з границею плинності 640 МПа. Нижня поверхня крила виготовлена з покращеного складу сплаву 2324-Т39, який має високі значення характеристик міцності та втоми. У фюзеляжі застосований сплав 2524-Т3 з високими значеннями показників міцності, втоми та тріщиностійкості.

Лідером застосування нових перспективних матеріалів на сьогодні є літак А-380, який було створено в Європі (рис. 1). Він розрахований на 555 пасажирів, що на третину більше, ніж у основного конкурента – «Боїнг-747». Перший у світі двоповерхневий (або двопалубний) літак має чотири двигуни. Його довжина – 73 м, розмах крилів – 79,8 м, висота – 24 м. Лайнер здатен літати без посадки та дозаправки 15 тис. км. Для верхньої поверхні конструкції крила використовують високоміцний сплав 7055-T77, для нижньої поверхні – покращений склад сплаву 2324-T39. Для верхньої частини фюзеляжу застосовують сплав 2524-T3, у нижній частині – зварювальний корозійностійкий сплав 6013-T6. Оперення літака та центроплану крила виготовляють із композиційних матеріалів. Заміна матеріалу дозволила зменшити вагу конструкції та підвищити технологічність її виготовлення.

В російських конструкціях літаків широко представлені сплави двох систем легування – Al-Cu-Mn та Al-Zn-Mg-Cu. Для зовнішньої обшивки фюзеляжу та несучих бокових і нижніх поверхонь крила, які піддаються втомному навантаженню, використовують сплав Д16-Т, а для силових елементів фюзеляжу (шпонок, стрингерів) та обшивки верхньої несучої поверхні крилець, на які діють усадкові напруження – сплав В96 (7075). Зараз проводять розробки на основі традиційних сплавів з метою покращення їх міцності, в'язкості та властивостей втоми.

Для зменшення маси машин однією з важливих передумов є досконала технологія виробництва. Окрім термічної, механічної та пластичної обробки вона включає ефективні способи зварювання. Хоча вони у виробництві літальних апаратів відрізняються малою продуктивністю, високою вартістю обладнання, водночас, при цьому забезпечують високу надійність з'єднання та здатність протистояти жорстким умовам експлуатації. До числа таких способів з'єднання типових елементів з алюмінієвих сплавів відносять дугове зварювання металевим плавким електродом в середовищі захисного газу. Воно не знайшло широкого застосування в аерокосмічній промисло-

вості, оскільки не забезпечує достатньо високих механічних властивостей з'єднання та необхідного рівня надійності. Тим не менш, даний спосіб з'єднання алюмінієвих сплавів є головним при зварюванні підвісних відсіків для пального та окислювача ракет різного класу.

Наприклад, при виготовленні конструкції баку з алюмінієвих сплавів 2014 і 2219 ракети Saturn-V найбільшу перевагу отримало дугове зварювання вольфрамовим електродом в середовищі захисного газу. Були виготовлені зварні конструкції корпусу ракетних двигунів та паливні баки ракет із алюмінієвих сплавів із використанням технології дугового зварювання. Надійність з'єднань забезпечувалася шляхом створення ефективного відводу тепла позаду дуги, що значно знизило залишкові напруження та деформацію з'єднань [5].

При виготовленні елементів багаторазового космічного корабля Space Shuttle широке застосування знайшла технологія плазмового зварювання (рис. 2) з перемінною полярністю дуги, опрацьована на фірмі Hobart Brothers. Метод спеціально розроблено для зварювання товстих профілів з алюмінієвих сплавів, які використовуються для підвісних паливних відсіків кораблів типу Shuttle (рис. 3). Найбільше ефективним виявився термічний цикл при режимі: імпульс зворотного струму 15...20 мс, прямого – 2...5 мс; сила прямого струму при цьому на 30...50 А вища, ніж зворотного. Це створює умови концентрованого нагрівання основного металу, що дозволило скоротити кутову деформацію зварного з'єднання.

Для з'єднання стрингерів з обшивкою в літаках серії Airbus 318 і 380 як альтернативний варіант клепаним з'єднанням застосовують лазерну технологію [15]. При зварюванні фюзеляжу винищува-



Рис. 1. Літак А-380 на зльоті

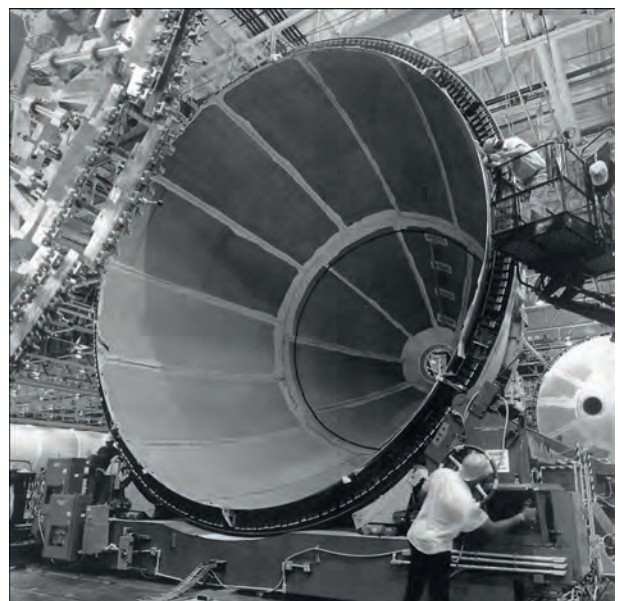


Рис. 2. Зварювання купола зовнішнього бака для палива космічного корабля багаторазового використання Space Shuttle (США)



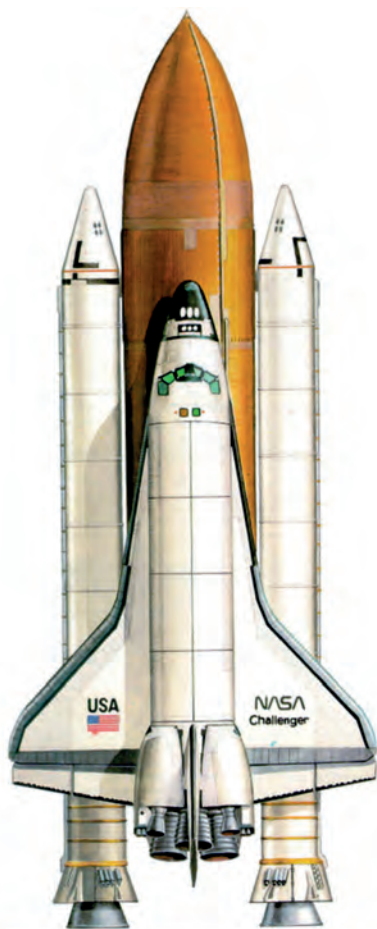


Рис. 3. Зовнішній вигляд базового паливного відсіку кораблів типу Space Shuttle

ча F-22 замість клепаних конструкцій використовували електронно-променеве зварювання [10]. Найбільший обсяг впровадження мають дифузійне та електронно-променеве зварювання, а також комбінований спосіб зварювання тертям з перемішуванням [17–19]. Основними вимогами до технології є висока якість з'єднання, забезпечення мінімального ризику в умовах експлуатації виробу та допустима вартість виробництва.

Комплексна технологія обробки алюмінієвих елементів та їх з'єднання дозволила фірмі Boeing виготовити бак для рідкого кисню та паливний відсік стартового прискорювача ракети-носія серії Delta. Конструкція баку, який завантажується кри-

огенним паливом, займає значну частину габаритів літального апарата. Відсік стартового прискорювача складається з двох типів баків довжиною 12 та 8,4 м, а також проміжного циліндра довжиною 4,8 м і діаметром 2,4 м.

Зараз проводяться підготовчі роботи до запуску ракети Delta-VI. Баки для неї планують виготовити з алюмінієвого сплаву 2598. Оскільки бак має значні габарити, то його зварювання планується виконати у вертикальному положенні. При цьому бак буде переміщуватися відносно платформи зі зварювальною установкою. Компанія Boeing розробила такий технологічний процес та очікує збільшення числа комерційних запусків супутників за допомогою ракет серії Delta та планує випускати до 100 баків на рік. Окрім цього, компанія проводить широкомасштабні дослідження експлуатаційних властивостей зварних з'єднань та відбувається розробка нової технологічної документації. Така стратегія виробництва зумовлена розширенням сфери застосування новітніх способів зварювання для виготовлення зварних конструкцій на цивільних та військових заводах.

Активно ведуться роботи також із освоєння криволінійних з'єднань. Для виготовлення надлегких підвісних відсіків багаторазового повітряно-космічного апарату типу Space Shuttle, НАСА (рис. 3) використана технологія зварювання тертям з перемішуванням для з'єднання листів товщиною від 2 до 5 мм сплаву 2198 системи Al–Li. Такі елементи конструкції служать для розміщення компонентів палива та зазвичай мають довжину 47 м і діаметр 8,38 м. Результати дослідження якості швів підтвердили, що дана технологія може повністю замінити плазмові та електронно-променеві способи зварювання при роботі з алюмінієвими сплавами [12, 13]. Низька величина погонної енергії зварювання створює необхідні для формування шва теплофізичні умови, тобто реалізуються умови, за яких деформується твердий розчин, що позитивно виявляється на значеннях фізико-механічних властивостей з'єднань, ступеня втрати міцності металу в зоні нагрівання, деформації зварних виробів.

Спосіб зварювання тертям з перемішуванням було відпрацьовано й для з'єднання нового алюмінієво-літєвого сплаву – C458 (Al–1,8Li–2,7Cu–0,3Mg–0,08Zr–0,3Mn–0,6Zn), який характеризується більш низькою щільністю ( $0,026 \text{ кг/см}^3$ ) порівняно з іншими алюмінієво-літєвими сплавами та високим модулем пружності, ніж сплав 2219. Отримані результати дослідження зварюваності та фізико-механічних властивостей зварних з'єднань дозволяють прогнозувати, що завдяки заміні традиційних сплавів на новий сплав C458 у конструкції паливного баку багаторазового корабля можна

заощадити витрати на виробництво та обслуговування від 2 до 4 млн дол. протягом 400 польотів.

Перспективний аналіз (до 2020–2030 рр.) використання матеріалів на алюмінієвій основі в літальних апаратах свідчить про те, що ці сплави збережуть лідерство в конструкціях літаків, наприклад, планера біля 80 %. Головна тенденція їх розвитку, яка ґрунтується на підвищенні міцності та зниженні питомої ваги сплаву, в подальшому зростатиме. Водночас необхідно відмітити, що підвищення зазначених характеристик, зазвичай, базується на ускладненні хімічного складу сплаву, необхідності оптимізації режимів термічної обробки та інших технологічних заходів, включаючи й зварювальні процеси, які викликають зниження пластичних і ресурсних властивостей матеріалів. Тому створення якісних нероз'ємних конструкцій з нових матеріалів на алюмінієвій основі є значною науковою та технологічною проблемою, яка спонукає до широкомасштабного дослідження та освоєння нових способів зварювання алюмінієвих сплавів із урахуванням того, що зварні з'єднання повинні працювати з високим ступенем надійності у складних умовах експлуатації.

Аналогічна тенденція перспектив застосування нових способів зварювання спостерігається також у **галузі суднобудування**. Основним конструкційним матеріалом при будівництві швидкісних суден для експлуатації в умовах морських і річкових басейнів є алюмінієві сплави групи 5XXX системи легування Al–Mg–Mn. Вони мають порівняно зі сталлю суттєві переваги – високу корозійну стійкість в морській воді. Крім того, алюмінієві корпуси не заростають мушлями, що зберігає обтікання судна та збільшує швидкість проходження в міжремонтний період, а це знижує затрати на експлуатацію та пофарбування. Тим самим забезпечуються умови, необхідні для роботи у водному середовищі (рис. 4). Раніше в суднобудуванні широко використовували різні способи зварювання плавленням, особливо зварювання плавким електродом. За останні роки в даній галузі машинобудування відмічається значний інтерес до впровадження технології зварювання тертям. При цьому використовуються усі типи зварного з'єднання: стикові, таврові, кутові тощо. Найбільший розвиток цей спосіб зварювання отримав у Скандинавських країнах Європи.

Поширенню технології зварювання тертям з перемішуванням сприяла успішна розробка зварювального обладнання, що було розроблено фірмою ESAB (Швеція) за ліцензією, придбаною в Технологічному інституті зварювання (Великобританія). Відповідно до даних, поданих фірмою ESAB, створення серії установок SuperStir базується на використанні стандартних машин модульного типу. Така промислова стратегія дозволила розробити ти-

повий ряд зварювального обладнання для з'єднання різних груп алюмінієвих сплавів. Розроблені на модульній основі установки охоплюють весь діапазон параметрів робочого простору під габаритні розміри зварювальних панелей від 0,5×1,5 до 10×20 м. До складу обладнання входять спеціальні пристрої затискувачів із зубчатим механізмом переміщення, зварювальна машина та комп'ютерна система керування. Зварювання виконують в автоматичному режимі. Параметри процесу зварювання реєструються завдяки вбудованій системі оперативного контролю.

Одна з установок SuperStir була випробувана норвезькою суднобудівною компанією Marine Aluminium при виготовленні корпусів швидкісних катерів та великих корпусних поромів з алюмінієвих панелей розміром 6×16 м. При цьому була

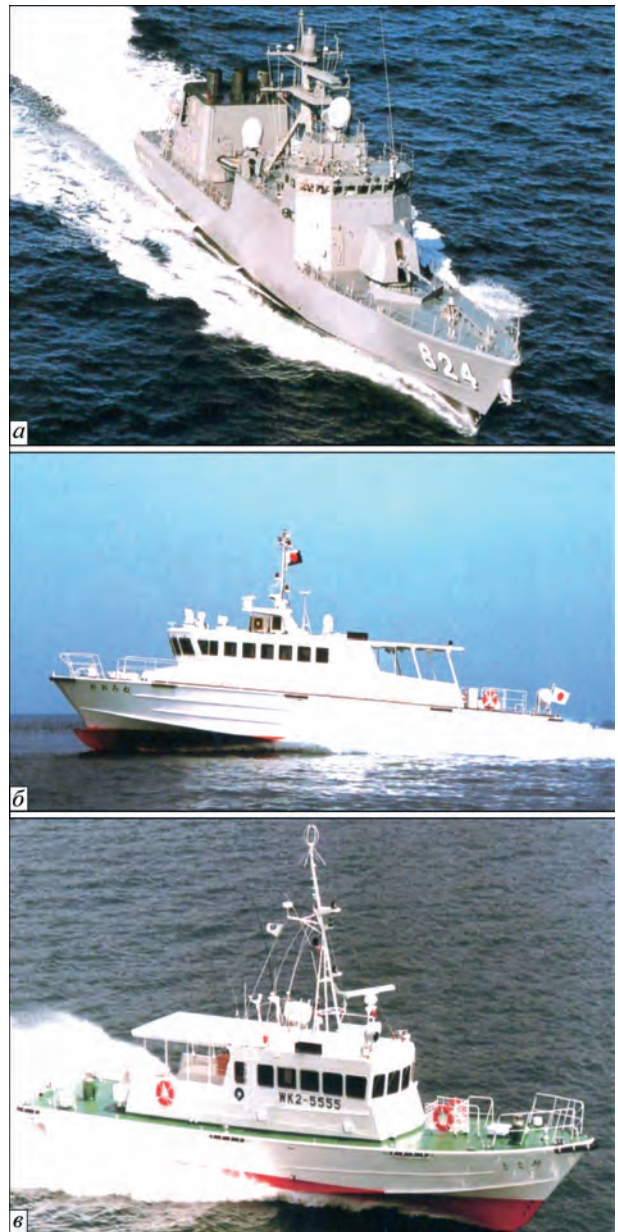


Рис. 4. Приклади використання алюмінієвих сплавів в суднобудівельних конструкціях (Японія): а – прикордонний катер; б – катер для прогулянки; в – малий риболовецький траулер



проведена оцінка експлуатаційних властивостей зварних з'єднань сплавів 6082 і 7108 та визначена можливість використання алюмінієвих панелей, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням, для обшивки морських суден. Отримані результати показали, що зварні зразки після очищення від продуктів корозії та подальшого розтягу мали високу антикорозійну стійкість в умовах циклічних випробувань у камері з морським середовищем протягом 1000 год при вологості 98 %, а також температурі 50 °C й вище. Високі властивості при балістичних випробуваннях показали зварні з'єднання сплаву 2519-T87, отримані з використанням зварювання тертям з перемішуванням. Вони дозволили фірмі General Dynamics Land Systems у співдружності з Edison Welding Institute зварювати алюмінієві плити розміром 1219×121×31,8 мм для створення нового покоління конструкцій морських броньованих амфібій [15].

Шведська фірма SAPA разом з Технологічним інститутом зварювання (Великобританія) розробила та впровадила у виробництво зварні панелі для холодильних установок швидкого заморожування [14]. До зварних з'єднань цих панелей застосовуються підвищені вимоги щодо щільності швів, оскільки вони утримують холодні речовини, небезпечні для людини та навколишнього середовища. Ця ж фірма, використовуючи зварювання тертям з перемішуванням, опанувала виробництво зварних панелей для станцій попереднього стискання рибної маси перед заморожуванням. Конструкція подібної станції складається з 17 панелей товщиною до 30 мм із загальною довжиною шва 16 м. Обладнання заводу SAPS Profil (Швеція) дозволяє зварювати з пресованих профілів довгомірні та широкі панелі розміром 14,5×3,0 м для виготовлення палуб суден, кришок і бокових частин вагонів залізничних потягів та метро.

У галузі автомобілебудування привабливими якостями алюмінієвих сплавів для конструкторів є: зниження маси автомобіля та, відповідно, зменшення використання палива; заміна дефіцитної міді та корозійностійкої сталі; більш широкі сировинні можливості порівняно з іншими металами; висока ефективність переробки (рециклювання) алюмінієвих фрагментів і деталей після закінчення строку експлуатації автомобілів. Спеціалістами підраховано, що кожний кілограм алюмінію, використаний в конструкції автомобіля, дозволяє протягом строку служби машини заощадити 7...10 л палива.

Аналіз динаміки зростання обсягів застосування алюмінію та його сплавів в легкових автомобілях країн ЄС і США показують, що вже в 2000 р. загальна маса вузлів і деталей з алюмінію складала 120...150 кг або біля 10 % усієї маси авто-

мобіля. Прикладом перспективних можливостей застосування алюмінієвих сплавів є автомобіль «Porsche 928», в конструкції якого майже 300 кг алюмінієвих деталей, що складає біля 20 % загальної маси автомобіля. Фірмою «Ford Motor Company» розроблена нова модель автомобіля «Synthesis-2010», конструкція якого виготовлена в основному з алюмінію, що забезпечує практично його повне рециркулювання. Зварний алюмінієвий несучий кузов має масу на 46 % меншу, ніж відповідний кузов, виконаний зі сталі. Автомобіль має трьох циліндровий двигун з алюмінієвим блоком циліндрів.

Широко використовуються алюмінієві сплави в конструкції кузовів автомобілів класу «Ауді-А8», «Лотус», «Експедшен» («Форд»), «Навігатор», тощо. Зазначені моделі автомобілів відносять до високого класу спортивних або так званих позашляховиків (рис. 5). Обсяг виробництва таких автомобілів не перевищує 0,1...0,2 % загального обсягу випуску легкових автомобілів у світі.

Найбільш поширеними вузлами та деталями автомобілів з деформованих і литих алюмінієвих



Рис. 5. Приклади використання алюмінієвих сплавів в легкових автомобілях: а – «Феарді» Z33; б – «Скайнлайн» V35

сплавів є каркас (рама), теплообмінники (радіатор і обігрівач), бампер, двері, кришка багажника та капота, кузов, диски коліс, блок циліндрів, поршні, профілі зовнішнього та внутрішнього оброблення, кабіни кузовів і борти вантажних автомобілів, паливні баки (рис. 6). В закордонних марках легкових автомобілів каркасної конструкції для рам та інших елементів застосовуються пресовані профілі з алюмінієвих сплавів. Так, автомобільна компанія AOS/APC проінформувала про широке впровадження в процесі виготовлення зварної рами автомобіля з алюмінієвого профілю метода зварювання тертям з перемішуванням.

В табл. 2 подано основні типи зварних з'єднань та способи зварювання, які знайшли широке застосування при виготовленні елементів конструкції автомобілів з алюмінію та його сплавів. Їх реалізація у виробництві автомобілів була зумовлена рішенням цілого ряду виробничих процесів. До їх числа слід віднести: відсутність алюмінієвих сплавів оптимального складу для виготовлення кузовів вантажних і легкових автомобілів; низька границя плинності сплавів порівняно зі сталлю; відсутність серійної технології штампування автомобільних заготовок, особливо тонкостінних виробів, підготовки алюмінієвого напівфабрикату під зварювання (лазерне, контактне, дугове) і подальшого нанесення захисних покриттів. Сьогодні розвиваються нові конструктивно-технологічні, металургійні та організаційні заходи, які в основному направлені на подальше зниження маси кузова та затрат палива, покращення екологічних показників, високу надійність та подовжений ресурс, а також високу комфортність і безпеку при експлуатації автомобіля.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку автомобілебудування показує, що сьогодні відмічаються три основних напрямків застосування алюмінієвих сплавів при виготовленні кузовів автомобілів. Перше – це всі деталі та вузли кузова в автомобілях з несучим кузовом. Друге – це навісні деталі та вузли капотів, кришок багажників, люків, знімальних крил, дверей, паливних баків, силових балок переднього та заднього бамперів, систем вихлопу тощо. Третє – це деталі та вузли автомобілів рамної конструкції кузова. Останній напрямок особливо широке розповсюдження знайшов у США та Європі. Для цього широко застосовуються алюмінієві сплави систем легування Al–Mg, Al–Mg–Si, Al–Zn–Mg, сплави 5083, 5456, 5556, 6061, 6013, 7033. В Росії застосовуються їх аналоги: АВ, АД33, АД37, АМг2, 1515, 1523. Для силових конструкцій та вузлів автомобілів широко використовуються сплави систем Al–Mg і Al–Mg–Sc: 1535, 1545, 1570, АМг6, для систем вихлопу – сплави 1419, САП-3, 1151, для силових важелів торсіонів, штанг – сплав 1970, АК6, 1460, 1933, 1973.





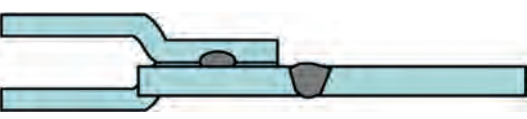

Алюміній та його сплави також застосовуються в транспортних засобах сільськогосподарського призначення, включаючи виробництво вантажних автомашин для перевезки тварин, рефрижераторів, муковозів, спеціалізованих кузовів автомобілів і причепів для транспортування мінеральних добрив. Окрім зниження маси кузова машин та збільшення корисного навантаження, що знижує транспортні затрати та економить паливо, при цьому забезпечується висока гігієнічність та подовження строку експлуатації. Впроваджені також зварні конструкції цільноалюмінієвих бортових і самоскидних платформ, які використовують у міжнародних перевозках легкових автомобілів. Також розроблено конструкції напівпричепів з



Рис. 6. Приклади використання алюмінієвих сплавів у вантажних автомобілях: а – «Toyota» FCHV; б – надлегкий вантажний автомобіль FU з алюмінієвими рамами; в – кузов самоскиду з алюмінієвого сплаву



Таблиця 2. Основні типи з’єднання та способи зварювання алюмінієвих сплавів при виготовленні елементів конструкцій автомобілю

Елемент конструкції	Сплав	Товщина, мм	Спосіб зварювання	Основний тип з’єднання
Крила передні та задні	АМг2, сплави системи Al-Mg-Sc (1523)	1,0...2,5	Лазерна, контактна (точкова або шовна)	
Двері	АМг2, АД37, АМг4, 1523, 1535	1,0...2,0	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова	
Капоти, кришки	АМг2, АМг4, АД37, сплави системи Al-Mg-Sc (1523, 1535)	1,0...2,5	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова	
Паливний бак	АМг2, АМг4, АМг6, сплави системи Al-Mg-Sc (1523)	1,5...2,5	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова, автоматична аргонодугова	
Система вихлопу газів	1419, 1151, САП	1,2...1,8	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова, автоматична аргонодугова	
Силові елементи, лонжерони, бампер	АМг4, АМг6, АД37, сплави системи Al-Mg-Sc (1535, 1545, 1570)	1,5...3,0	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова, автоматична аргонодугова	

бортами та решітками для тентів з алюмінієвих профілів, напівпричепів-фургонів загального використання, напівпричепів-рефрижераторів різної вантажності.

Арсенал зварювальних технологій постійно зростає. Поряд зі зварюванням CO<sub>2</sub>-лазером (потужністю до 5 кВт) та Nd:YAG-лазером (потужністю до 6 кВт) плит з алюмінієво-магнієвих сплавів товщиною 0,5...1,5 мм, розпочато використання гібридних лазерно-дугових технологій (лазер + MIG), які дозволяють знизити витрати електроенергії та вимоги щодо точності складання стиків між елементами конструкції. Вимоги до якості підготовки кромки, точності складання стику для зварювання алюмінієвих сплавів включають: наявність строго прямолінійних кромки без задирів при хвилястості не більш 0,04 мм. Зазор в стику між кромками товщиною 0,5...3,0 мм не має перевищувати 0,08 мм. На деяких підприємствах і фірмах США експлуатуються нові установки для виконання технології електронно-променевого зварювання без вакууму [19]. В Японії проводяться дослідження щодо застосування зварювання тонколистового (0,8...1,5 мм) алюмінію та його сплавів для автомобілебудування. Вибір процесу зварювання при організації виробництва базується на аналізі їх технологічних можливостей. Значну увагу має вартість в залежності від типу та обсягів виробництва.

В залізничному транспорті алюміній та його сплави застосовують у вигляді штампованих і пресованих заготовок при виготовленні буксів вагонів [20]. Маса буксів при цьому знижується вдвічі. Демпфуючі властивості алюмінію сприяють зменшенню на 10 % напруження на рейки та елементи конструкції вагону. Завдяки високій корозійній стійкості та хорошій зварюваності алюмінію, його з успіхом використовують при виготовленні цистерн для перевезення концентрованої азотної кислоти, молока, виноматеріалів, розплавленої сірки та інших хімічних матеріалів. В інтер'єрі пасажирських вагонів широко використовують профілі та інші напівфабрикати. Труби з внутрішнім плакуванням з корозійностійкого алюмінієвого сплаву використовують для систем водопостачання та нагрівання вагонів. Термін їх служби в 10 раз більший, ніж металевих, що виключає необхідність ремонту систем за період експлуатації. В даний час розглядається можливість використання в конструкціях вагонів великогабаритних панелей з алюмінієвих сплавів шириною до 800 мм в якості елементів силових конструкцій. Значну перевагу мають алюмінієві транспортні контейнери усіх типів порівняно зі сталевими виробами. Їх маса вдвічі менше

сталей, а корозійна стійкість значно вища, вони більш довговічні та економічні в експлуатації, оскільки мають більш високе корисне навантаження і не потребують фарбування.

**В будівництві громадських та промислових споруд** основою для застосування алюмінієвих сплавів систем легування Al–Mg, Al–Mg–Si, Al–Mg–Zn, Al–Cu–Mg стали висока міцність, відсутність порогу холодноламкості, мала щільність, висока пластичність, хороша стійкість проти корозії, відсутність іскроутворень при ударі, антимагнітні властивості, висока сейсмостійкість, бактерицидність, а також хороший зовнішній вигляд конструкції [15–18]. Алюмінієві будівельні конструкції не схожі на сталеві. Найбільш економічними виявилися плоскі листи, іноді об'ємні деталі та пресовані стержні, які разом складають просторові системи.

Широке застосування отримали дугові технології неплавким і плавким електродами, автоматичне зварювання по слою флюсу. В останні роки спостерігається використання імпульсно-дугового зварювання, при якому напруження та струм змінюються за відповідним законом, що дозволяє отримувати якісні шви в різних просторових положеннях під час виготовлення конструкцій складної конфігурації.

Слід зазначити, що не дивлячись на переваги застосування алюмінієвих конструкцій, пошук раціональних технічних рішень їх виготовлення збільшує вартість проектування в декілька разів порівняно зі сталевими. Це зумовлено необхідністю глибокого опрацювання конструктивних схем і форм перетинів конструкційних елементів і проведення натурних випробувань окремих зразків для встановлення ресурсних і корозійних властивостей виробів. Водночас значні витрати на проектування окупаються термінами експлуатації таких конструкцій, оскільки мінімальна вартість зварного виробу за участю окремих елементів з алюмінієвих сплавів обернено пропорційними витратам при опрацюванні проекту.

Експлуатація алюмінієвих конструкцій має свою специфіку. Витрати при цьому йдуть, головним чином, на те, щоб забезпечити систематичне спостереження за станом поверхні елементів конструкцій та ділянок їх поєднання з деталями з інших матеріалів, які бажано відповідним чином ізолювати від алюмінію. При відсутності агресивних середовищ (галоїдів або лугів) алюмінієві конструкції не потребують витрат на ремонт протягом 20...50 років.

Особливо ефективно застосування зварювальних алюмінієвих сплавів в спорудах, розташованих в Арктиці, Антарктиді, гірських місцевостях і пустелях. Це пов'язано зі здатністю сплавів

підвищувати міцність за умов низьких і криогенних температур, зберігаючи при цьому пластичність, яку вони мають при кімнатній температурі (20...25 °C).

Значний економічний ефект отримують від алюмінієвих сплавів при будівництві або реконструкції мостових переходів. В останньому випадку є можливість не тільки зберегти архітектурний облік мосту, але й збільшити потік руху транспорту. Не дивлячись на значну різницю в структурі алюмінію та бетону, алюмінію та армоцементу, що використовуються, основою є порівняно низький модуль пружності цих матеріалів, що дозволяє їх залучати до схем просторових армоцементних і залізобетонних конструкцій.

Таким чином, представлені приклади світового освоєння зварних легких конструкцій в різних галузях машинобудування свідчать про різноманітність технологічних можливостей та форм реалізації унікальних властивостей алюмінію та його сплавів. Вони відображають тенденції світового виробництва та споживання, які поширюють спектр їх використання шляхом удосконалення способів зварювання та розробки нових технологій з'єднання. Ефективність конструкцій визначається функціональними вимогами виробів, зварюваністю обраного алюмінієвого сплаву та рівнем технології його з'єднання при мінімальних витратах та термінах виготовлення. Поява більш досконалих сплавів із відповідними фізико-механічними та технологічними властивостями поряд із раціональними способами нероз'ємного їх з'єднання забезпечують високу якість швів і надійність зварної конструкції.

Аналогічний процес відбувається і в Україні. Але темпи його реалізації дуже повільні. Для інтенсифікації виробництва легких конструкцій необхідно промислове освоєння новітніх досягнень високотехнологічних процесів, включаючи зварювання. Це забезпечить зростання продуктивності виробництва зварних конструкцій при скороченні ручного труда, зниженні трудомісткості, поліпшенні екологічних умов при виготовленні типових елементів конструкцій, що відкриє перспективу створення нових зразків від аерокосмічної техніки до наземних і водних засобів, а також ефективних будівельних та мостових споруд з широким використанням зварних деталей та вузлів з алюмінієвих сплавів.

## Список літератури/References

1. Ищенко А.Я., Лабур Т.М., Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях*. Киев, Экотехнология.  
Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M., Bernadsky, V.N., Makovetskaya, O.K. (2006) *Aluminium and its alloys in modern welded structures*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].



2. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка.
- Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Teh N.J. (2006) Small joints make a big difference. *TWI Connect*, 143, 4, 1–7.
4. Aota K., Okamura H., Masakuni E. et al. (2001) Heat inputs and mechanical properties friction stir welding. *Proc. of the 3rd International Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27–28 September*, pp. 453–457.
5. Norlin A. (2000) A century of aluminium – a product of the future. *Svetsaren*, 2, 31–33.
6. Dilthey U., Behr W. (2000) Elektronen-strahlschweißen in Atmosphäre. *Schweißen und Schneiden*, 8, 461–465.
7. Bierman B., Dierken R., Kupfer R. et al. (1992) Laser Beam Cutting and Welding of Al–Li sheets. *Sixth International Aluminium-Litium Conference, 1991, Garmisch-Partenkirchen. Informations gesells chaft, Verlag*, pp. 1159–1164.
8. (1998) New Applications for TWBs – and Laser Welding. *Welding and Joining Europe*, 10.
9. Вильгельм М., Рацим К. (2008) Материалы и процессы как факторы прогресса в автомобилестроении. *Черные металлы*, 3, 33–38.
- Wilhelm, M., Ratsim, K. (2008) Materials and processes as factors of progress in motor industry. *Chyornye Metally*, 3, 33–38 [in Russian].
10. Кривов Г.А., Матвиенко В.А., Афанасьева Л.Ф. (2003) *Мировая авиация на рубеже XX–XXI столетий. Промышленность, рынки*. Киев, КВЦ.
- Krivov, G.A., Matvienko, V.A., Afanasieva L.F. (2003) *World aviation at the turn of the XX–XXI centuries. Industry, markets*. Kiev, KVITs [in Russian].
11. Дмитриев В.Г., Замула Г.Н., Коновалов В.В., Нестеренко Г.И. (2003) Приоритетные направления совершенствования материалов для конструкций перспективных самолетов. *Технология легких сплавов*, 1, 3–8.
- Dmitriev, V.G., Samula, G.N., Konovalov, V.V., Nesterenko, G.I. (2003) Priority directions of improvement of materials for prospective aircraft structures. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 1, 3–8 [in Russian].
12. Hibben M., Stemmiel F. (1999) Tailored Blanks aus Alluminium. *Blech Rohre Profile*, 42, 6, 394–397.
13. Ole T. Midling, Ljana Djapic Oosterkamp, Jan Bersaas (1998) Friction Stir Welding Aluminium-process and applications. *Proc. 7th Int. Conf. on Joints in Aluminium (INALCO-98). TWI, Abington. Cambridge. UK. 15–17 April 1998*.
14. Campbell G., Stotler T. (1999) Friction Stir Welding of Armour Grade Aluminium Plate. *Welding Journal*, 12, 45–47.
15. Yasuda K., Isizawa Y., Kitaura I. (1996) Study on Hybrid Joining Method Using TIG Arc Welding (Report 1). *Welding of light metals*, 34, 11, P. 537–543.
16. Wemah K. (2000) Equipment for Aluminium Welding. *Svetsaren*, 2, 11–13.
17. Jkura I., Nagisawa N., Iwata S., Kitamura K. (2014) Technological developments for realizing aluminium bridges. *Journal of Japan institute of light metals*, 54, 9, 380–387.
18. Okura I. (2003) Application of the Aluminium Alloys to Bridges. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 41, 10, 441–446.
19. Nakagomi T., Ichikawa Y. (2013) The Present Condition of Application of the Aluminium Alloys to a Construction Steel Frame. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 41, 10, 447–451.
20. Sakurai K. (2003) Report of the Aluminium Alloy Bridges in Europe and United States. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 41, 10, 452–459.

## WELDED STRUCTURES FROM ALUMINIUM ALLOYS

T.M. Labur

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Examples of modern lightweight structures from aluminium and its alloys are given. Their applications in different mechanical engineering sectors are shown. The structure diversity reflects the technological capabilities and forms of realization of unique properties of this material. Trends in world production and consumption of such structures have been analyzed. It is noted that appearance of more advanced alloys with the respective set of physico-mechanical and technological properties, as well as rational selection of the processes of their permanent joining, provide a high quality of welds and welded structure reliability. Presented examples clearly illustrate the fact that the effectiveness of lightweight structures is determined by functional requirements to products, weldability of the selected aluminium alloy and level of its joining technology provided the expenses and production time are minimum. 20 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

**Keywords:** aluminium and its alloys, welding methods, welded joints, light welded structures, physico-mechanical and technological properties, weld quality, reliability, service conditions

Надійшла до редакції 06.11.2019

**XII Міжнародна спеціалізована виставка**  
**КИЇВСЬКИЙ**  
**ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК**

**МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**  
 Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15  
 тел.: (044) 201-11-58, 201-11-56, 201-11-56  
 e-mail: alexk@iec-expo.com.ua, plat@iec-expo.com.ua  
 www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

**31 березня – 3 квітня 2020**

Генеральний інформаційний партнер: **ПРАЙМ**  
 Ексклюзивний медіа-партнер: **ГОЛОВНОГО ВІСНИКА**  
 Технічний партнер: **Якщо**

**XIX МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020**  
 МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

**24 - 27 листопада**

**ОРГАНІЗАТОР:**  
 Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: **ПРАЙМ**  
 Ексклюзивний медіа-партнер: **ГОЛОВНОГО ВІСНИКА**

Технічний партнер: **Якщо**

**МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**  
 Україна, 02002, Київ  
 Броварський пр-т, 15  
 «Лівобережжя»  
 ☎ (044) 201-11-55, 201-11-56, 201-11-58  
 e-mail: alexk@iec-expo.com.ua, www.iec-expo.com.ua, www.mec.ukr  
 www.tech-expo.com.ua

# ПАЯННЯ – ПЕРСПЕКТИВНИЙ МЕТОД ОТРИМАННЯ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ

С.В. Максимова

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

В роботі представлено практичні результати розробок і досліджень в області паяння різних матеріалів: алюмінієвих, мідних, жароміцних нікелевих і титанових, а також перспективних матеріалів на основі інтерметалідів  $Ni_3Al$  та  $\gamma-TiAl$ , сталей різних марок. Приведено дані з реактивно-флюсового паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій в контрольованому газовому середовищі. Велика увага приділена отриманню паяних з'єднань з різномірних матеріалів: Мо+С (нержавіюча сталь), W+Cu, твердосплавний матеріал (ВК 20)+сталь, Al+сталь та інші. Показано ефективне застосування створених технологічних процесів паяння жароміцних нікелевих та титанових сплавів при виготовленні відповідальних конструкцій високотемпературного призначення, результати механічних випробувань паяних з'єднань. Створені припої і технологічні процеси високотемпературного вакуумного паяння застосовані при отриманні з'єднань зі сплавів нового покоління на основі алюмінідів нікелю та титану, які успішно пройшли випробування на довготривалу міцність в умовах підвищеної температури і постійно діючих напружень. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 14.

*Ключові слова:* паяні з'єднання, припої, вакуумне, реактивно-флюсове, газополуменеве паяння, жароміцні нікелеві, титанові сплави, довготривала міцність, різномірні матеріали, алюмінієві, мідні сплави

На сьогоднішній день паяння займає важливе місце серед різних методів отримання нероз'ємних з'єднань і знаходить широке застосування в різних галузях промисловості: авіаційній, космічній, приладобудуванні, автомобілебудуванні при виготовленні холодильної та криогенної техніки, на ювелірних підприємствах та ін. [1, 2]. Переваги паяння перед зварюванням полягають в можливості поєднання різних матеріалів без їх розплавлення, що забезпечує збереження вихідної структури основного металу за умови правильно вибраних температурно-часових параметрів технологічного процесу паяння і хімічної композиції припійного матеріалу. Важливе значення має застосування процесу паяння при з'єднанні матеріалів, які характеризуються незадовільною зварюваністю, через утворення тріщин в зоні термічного впливу та зварному шві [3]. Ще одним фактором на користь паяння є можливість поєднання режиму термічної обробки основного металу з термічним режимом паяння та автоматизацією з одночасним отриманням декількох елементів складної геометричної конфігурації [4]. Вирішальним фактором при паянні є можливість отримання з'єднань у важкодоступних ділянках, в яких неможливо з'єднувати основні матеріали традиційними методами зварювання. В таких випадках паяння є єдиною можливістю отримання з'єднань.

Разом з тим за наявності таких позитивних характеристик процесу паяння існують свої особливості і проблеми, які необхідно вирішувати з метою забезпечення експлуатаційних властивостей паяних конструкцій. До них відноситься хіміч-

ний склад і форма припою, що використовується. Наразі існує безліч припоїв на різних основах: олов'яній, алюмінієвій, мідній, срібній, нікелевій, титановій, залізній та ін. Застосовують їх в литому стані, у вигляді порошків, дротів різних діаметрів, пластичних стрічок, що отримані традиційними методами металургійної переробки або шляхом надшвидкого гартування та ін. [4, 5]. Вибір хімічного складу припою обумовлений фізико-хімічними властивостями основного металу і експлуатаційними характеристиками паяних виробів. Одним з показників сумісності припою з основним металом є здатність припою змочувати основний метал і розтікатись по його поверхні при температурі паяння [6, 7]. Застосування припоїв з широким інтервалом плавлення призводить до розвитку хімічної неоднорідності та ліквідаційних процесів в металі шва, а також до виникнення пористості. Застосування евтектичних припоїв забезпечує кристалізацію металу паяного шва при постійній температурі, але при цьому формується евтектична структура, яка часто сприяє окрихченню металу паяного шва. Тому кожна пара матеріалів, яку потрібно паяти, потребує індивідуального підходу і конкретного хімічного складу припою з заданим температурним інтервалом і механічними властивостями.

В Інституті електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України на протязі багатьох років проводять систематичні дослідження в області паяння, вивчають фізико-хімічні процеси, що протікають при нагріві до температури паяння, досліджують взаємозв'язок між механічними властивостями паяних з'єднань, структурою паяних швів, хімічним складом припою і основного металу. На базі ре-



зультатів досліджень створено припої, які сумісні з основним металом, розроблено технологічні процеси паяння, що забезпечують паяним з'єднанням необхідні експлуатаційні властивості. В даній роботі представлено деякі результати проведених досліджень і приклади практичного застосування в різних галузях промисловості.

**Алюмінієві паяні з'єднання.** В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено технологію паяння алюмінієвих сплавів і запропоновано метод пічного паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій (рис. 1) у контрольованому газовому середовищі (азот, аргон). Даний метод є екологічно безпечним і менш енергоємним в порівнянні з наявними методами паяння (наприклад, зануренням в сольові розплави).

Для високотемпературного паяння алюмінієвих сплавів серій 1000 ((90,3...99,98)Al) та 3000 (системи Al–Mn) використовуються припої системи Al–Si та негігроскопічний реактивний флюс сольової системи K,Al,Si/F, що забезпечують рівномірність паяним з'єднанням в умовах багаторазових ударів, вібрації згідно ТУ У 14307274-009:2016.

Температура плавлення припою та флюсу має бути нижчою за температуру солідусу алюмінієвого сплаву, що паяється, що і визначає верхню межу температурного інтервалу паяння. Виготовлено антенні решітки габаритних розмірів (640×640×26 мм). Маса антени складає 2,07 кг. Слід зазначити, що при виготовленні даної антени

необхідно отримати паяні шви довжиною біля 6000 мм. При цьому витрати флюсу незначні і становлять  $\leq 50$  г, що вигідно відрізняє вартість даного методу в порівнянні з існуючими.

Виготовлені в контрольованому газовому середовищі тонкостінні алюмінієві хвильоводи (рис. 2) характеризуються значною загальною площею паяного з'єднання, що становить близько 1562 мм<sup>2</sup>. При цьому витрати припою на одиницю виробу складають 1,1...1,5 г, флюсу – 2...3 г.

Отриманий паяний шов тонкостінної конструкції характеризується наявністю плавної галтелі, відсутністю дефектів (рис. 2, б).

Технологічний процес реактивно-флюсового паяння застосовується при виготовленні пластинчастих алюмінієвих теплообмінників електротермічного модуля рухомого складу на залізниці, що використовується для підготовки води, елементів НВЧ антен та ряду інших виробів народного господарства (рис. 3).

Габаритні розміри таких теплообмінників 145×160×82 мм, кількість пластин налічує 82 штуки і сумарна площа паяного з'єднання становить 1740 мм<sup>2</sup>. Витрати флюсу незначні і становлять  $\leq 20$  г.

В даному випадку паяння протікає із застосуванням реактивного фтористого флюсу, який при нагріванні до температури паяння розплавляється, взаємодіє з алюмінієм і утворює рідку фазу системи Al–Si, що близька до евтектичного складу і слугує припоєм [8]. Отримані паяні з'єднання характеризуються наявністю паяних швів, ширина яких значно менша за ширину швів, що отримані із застосуванням флюсу з припоєм (рис. 4).

**Різнорідні паяні з'єднання.** Вибір і використання різнорідних металів в якості конструкційних матеріалів визначається експлуатаційними вимогами, економічними показниками, що пред'являються до готових виробів. Більшість високотехнологічного обладнання вміщує окремі вузли з різнорідних матеріалів, які отримують шляхом паяння. Слід відмітити, що при паянні різнорідних матеріалів виникають проблеми, що обумовлені різними фізико-хімічними властивостями основ-



Рис. 1. Загальний вигляд паяної антенної решітки



Рис. 2. Зовнішній вигляд тонкостінного алюмінієвого хвильоводу (а), паяний шов по периметру конструкції (б)

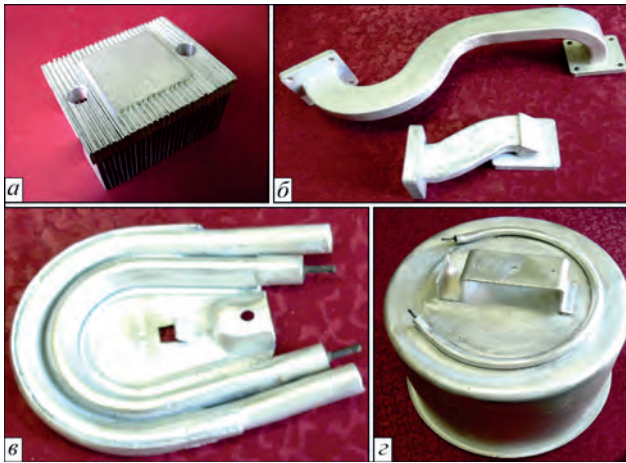


Рис. 3. Паяні вироби з алюмінієвих сплавів: *a* – пластинчастий алюмінієвий теплообмінник; *б* – елемент модуля надвисокої частоти; *в* – нагрівальні елементи – тени для побутової техніки (*г*)

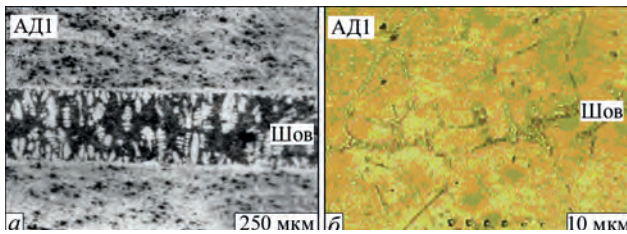


Рис. 4. Мікроструктура паяного шва алюмінієвого паяного з'єднання, що отримане з застосуванням припою і флюсу (*a*) та з флюсом без припою (*б*)



Рис. 5. Паяні трубні сталєво-алюмінієві перехідники (*a*) та паяна модель вузла дивертора Cu–W для термоциклічних випробувань (*б*)

них матеріалів. Суттєво впливає на якість паяних з'єднань різниця в коефіцієнтах термічного розширення, що сприяє появі внутрішніх напружень. Зменшенню впливу внутрішніх напружень забезпечує правильний вибір складу припою та температурно-часових параметрів процесу паяння.

Розроблена технологія флюсового індукційного паяння трубних сталєво-алюмінієвих перехідників (ТСАП) з прохідним діаметром (10...300 мм) в середовищі аргону (для криогенної техніки). Оскільки коефіцієнти термічного розширення основних різномірних матеріалів (корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т та алюмінієвого сплаву серії 3000 (АМц)) відрізняються, то при паянні виникають залишкові напруження в паяному з'єднанні. Їх рівень значно менший порівняно зі зварними з'єднаннями, що отримані наявними методами дугового зварювання. Паяні трубні сталєво-алюмінієві перехідники (рис. 5, *a*) успішно випробувано згідно вимог ТЗ за міцністю та герметичністю.

Отримані результати термоциклічних випробувань показують, що в умовах робочого тиску 1 МПа/см<sup>2</sup> паяні трубні сталєво-алюмінієві перехідники витримують 50 циклів при зміні температури від 35 до –196 °С зі збереженням герметичності та без руйнування. Вони характеризуються високою міцністю, що становить 0,95...0,98 від міцності сплаву АМц.

Особливий інтерес і значні труднощі представляє паяння пари різномірних матеріалів мідь–вольфрам, які знаходять застосування при виготовленні плазмотронів, потужних рентгенівських трубок, окремих вузлів дивертора термоядерного синтезу та ін. На основі систематичних досліджень розроблено технологічний процес вакуумного паяння різномірних з'єднань мідь–вольфрам, що призначені для використання в жорстких умовах термоциклічного навантаження і нейтронного опромінення. Для проведення таких випробувань виготовлено шляхом паяння моделі диверторів мідь–вольфрам (рис. 5, *б*). Під дією пульсуючого теплового потоку в моделі виникає нерівномірний розподіл температури. Потужність теплового потоку і тривалість його дії визначали таким чином, щоб максимальна температура на поверхні вольфрамового покриття і в зоні паяного шва на межі з мідною основою відповідала температурі конструкції при постійному потоці потужністю  $Q = 10 \text{ МВт/м}^2$ . Результати термоциклічних випробувань показали хороші термовтомні властивості на базі  $1 \cdot 10^3$  циклів (таблиця).

Після нейтронного опромінення дозою  $5 \cdot 10^{21}$  нейтр/см<sup>2</sup> при температурі 100 °С спостерігається підвищення міцності на розтяг стикових пая-



Результати термоциклічних випробувань паяних моделей дивертора Cu–W

Тип навантаження	Тривалість імпульсу/паузи, с	Потужність теплового потоку, МВт/м <sup>2</sup>	Кількість циклів <i>N</i>
1	0,3/18...25	26...28	1000
2	0,5/26...28	26...28	200
3	10/13	13/14	1000

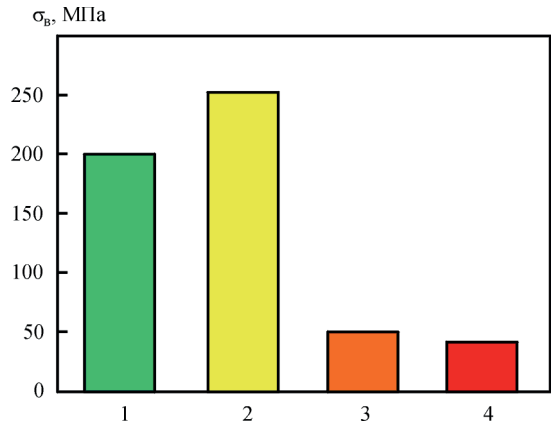


Рис. 6. Міцність паяних з'єднань Cu–W: у вихідному стані після паяння (1); після нейтронного опромінення в реакторі СМ-2 при  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  і дозі  $5 \cdot 10^{21}$  нейтрон/см<sup>2</sup> (2); при  $T = 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ , реакторі СМ-2, дозі  $5 \cdot 10^{21}$  нейтрон/см<sup>2</sup> (3); в реакторі БОР-60 при  $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , дозі  $5 \cdot 10^{22}$  нейтрон/см<sup>2</sup> (4)

них з'єднань з 200 (у вихідному стані після паяння) до 250 МПа, що пов'язано з процесами упорядкування твердого розчину в паяному шві, зразки зберігають достатню міцність і при 400 °C (рис. 6).

Створено технологічний процес вакуумного високотемпературного паяння різномірних з'єднань молібден – вуглецеві сплави (нержавіюча

сталь), які роботоздатні в жорстких умовах теплових навантажень (рис. 7, а, б).

Отримано паяні трубчаті з'єднання молібден–нержавіюча сталь з щільними паяними швами, в яких відсутні тріщини і сформована структура твердого розчину (рис. 7, в).

Різномірні з'єднання ковар–титановий сплав знаходять широке застосування в приладобудуванні. Для їх отримання шляхом паяння розроблено спеціальну технологію попередньої обробки основного металу (титанового сплаву) та з застосуванням радіаційного нагріву у вакуумі виготовлено окремі паяні вузли (рис. 8). Проведені випробування на герметичність дали позитивні результати і свідчать про якісне формування паяних швів.

Відпрацьовано флюсове паяння твердосплавних пластин до дисків пил і державок при виготовленні дискових пил для деревообробного та металообробного інструменту.

Процес паяння застосовується при виготовленні циліндричних елементів для напівпровідникових пристроїв, що складаються з різномірних матеріалів, таких як металізована кераміка 22ХС та ковар (або мідь).

Освоєно паяння різномірних матеріалів твердосплавних різців до лопатей корпусу (зі сталі) при виготовленні бурових доліт [9]. Окрім того, під час експлуатації доліт відбувається часткове руйнування поверхні твердосплавних різців та спостерігаються сколи (рис. 9, а), що знижує їх роботоздатність.

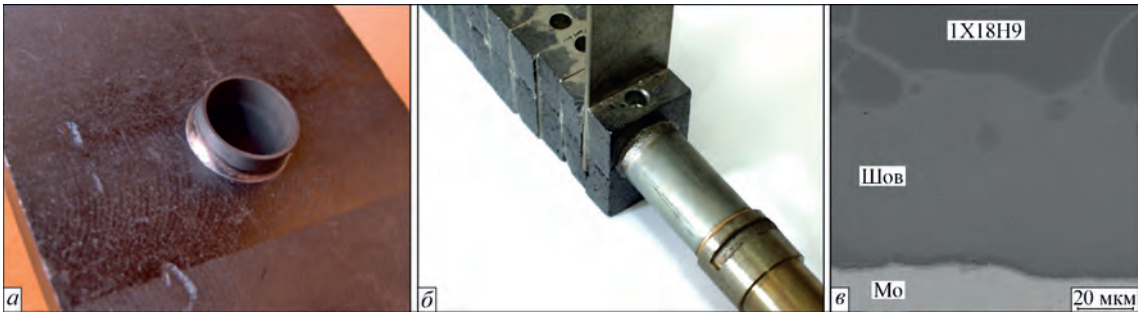


Рис. 7. Паяний вузол графіт–молібден (а) та модель диверторного пристрою (б), що містить паяні елементи Мо–С (нержавіюча сталь) для термоциклічних випробувань, які отримано шляхом вакуумного високотемпературного паяння; мікроструктура паяного з'єднання молібден–нержавіюча сталь (в)

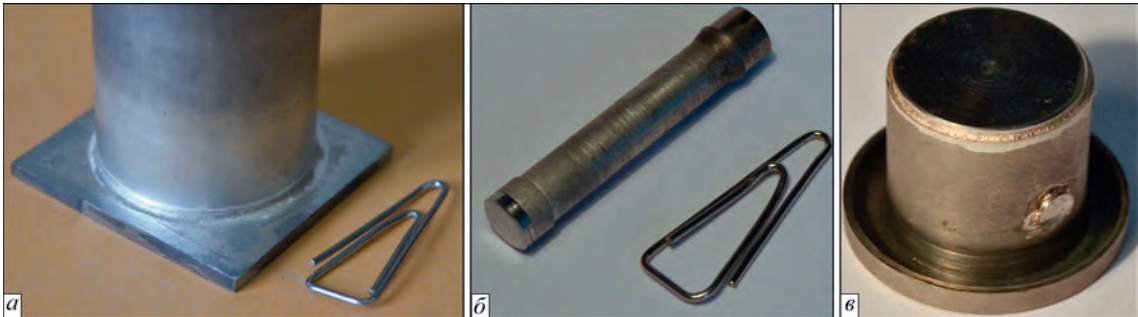


Рис. 8. Паяні зразки різномірних матеріалів ковар–титановий сплав: модельний зразок для випробувань на герметичність (а); трубчатий елемент (б); паяний вузол з заглушкою (в)



Рис. 9. Матричне долото діаметром 215,9 мм для поверхневого буріння при видобутку нафти та газу до (а) та після ремонту (б)

Тому виникає потреба в реставрації дефектів і проведенні ремонтних робіт шляхом флюсового паяння різномірних матеріалів сталі з твердосплавними різцями, а також в застосуванні міцних карбидовмістких покриттів. Це дозволяє продовжувати буріння відновленим буровим інструментом (рис. 9, б) зі значним заощадженням матеріальних ресурсів.

**Паяння міді та її сплавів.** Розроблено припої на базі системи мідь–фосфор, відпрацьовано флюсове і вакуумне паяння (ремонт) мідних сплавів, в тому числі бронз різних марок (дисперсійно-твердіючих типу БрХЦр), дисперсно-зміцнених сплавів (типу Glidcor 0,25  $Al_2O_3$ ), мельхіорів (МНЖМц31-1), куніалей (Cu–Ni–Al), нейзильберів (МНЦ15-20) та ін. Корозійностійкі мельхіори застосовують при виготовленні установок для опріснення морської води, медичного інструменту, в морському суднобудуванні.

При виробництві холодильного та теплообмінного (рис. 10, б) устаткування використовують капілярне паяння мідних трубопроводів. Теплообмінники (з міді, мельхіору – МНЖМц31-1) використовують у суднобудуванні.

В тепловозобудуванні та при виготовленні газових колонок застосовують теплообмінники (рис. 10, б), складовими яких є паяні елементи з міді (або латуні). Проведені дослідження міцності паяних з'єднань з міді МЗ та зі сплавів МНЖ-5-1 та МНЖМц 30-1-1 при статичних і циклічних навантаженнях дали позитивний результат і забезпечили надійну роботоздатність телескопічних та раструбних трубчатих конструкцій.

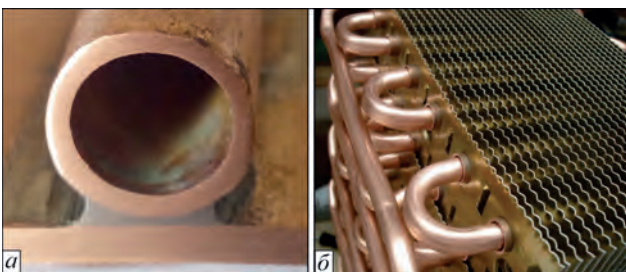


Рис. 10. Паяний елемент сонячного колектору (а) та теплообмінник (б)

Мідно-фосфорними припоями паяють мідні з'єднання, які складаються з трубчатих елементів і пластин, що використовують в сонячних колекторах для нагріву води (рис. 10, а) Сонячні колектори – це відмінний спосіб для заощадження енергоресурсів. Завдяки безкоштовній сонячній енергії можна на протязі (як мінімум) 6–7 місяців на рік забезпечувати теплу воду для господарських потреб, а в інші місяці ще й допомагати системі опалення [10]. При виготовленні сонячних колекторів можна також застосовувати технологічний процес паяння сталейних комплектуючих.

При паянні мідних трубчатих конструкцій ефективно можна застосовувати різні методи нагріву, в тому числі газополуменевий, дуговий або плазмовий, де в якості присадного матеріалу використовуються мідно-фосфорні припої з додатковим легуванням різними елементами.

**Високотемпературне вакуумне паяння жароміцних нікелевих сплавів.** Створення нероз'ємних паяних з'єднань при виготовленні конструкцій відповідального призначення з жароміцних нікелевих ливарних, дисперсійнотвердих, інтерметалідних сплавів на основі  $Ni_3Al$ , що експлуатуються при високих температурах, на сьогодні є важливим завданням та її вирішення визначає можливість використання даних матеріалів при виготовленні деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів, енергетичних установок, реактивних двигунів, теплотехнічного обладнання.

Для паяння нікелевих жароміцних сплавів широко застосовуються промислові припої на основі нікелю, в яких депресантами є кремній та бор. Дані елементи з одного боку знижують температуру плавлення і покращують розтікання, а з іншого, утворюють легкоплавкі крихкі (евтектичні) фази в паяних швах і в основному матеріалі [11–13], які неможливо розчинити навіть при тривалій ізотермічній витримці, що негативно впливає на механічні властивості паяних з'єднань при тривалій експлуатації в умовах підвищеної температури і постійно діючих напружень. Використання припоїв, що містять срібло, мідь, нікель, не забезпечує необхідний рівень жароміцності.

У зв'язку з цим проведені фундаментальні дослідження фізико-металургійних процесів, що протікають під час високотемпературного вакуумного паяння жароміцних дисперсійно-твердих нікелевих сплавів (IN 718), визначені закономірності структуроутворення паяних з'єднань. Встановлено, що отримання однофазної структури паяного шва забезпечує стабільні результати короткочасної міцності паяних з'єднань при кімнатній і підвищеній (550 °C) температурі, відповідно (рис. 11, а), а також високі показники довготри-



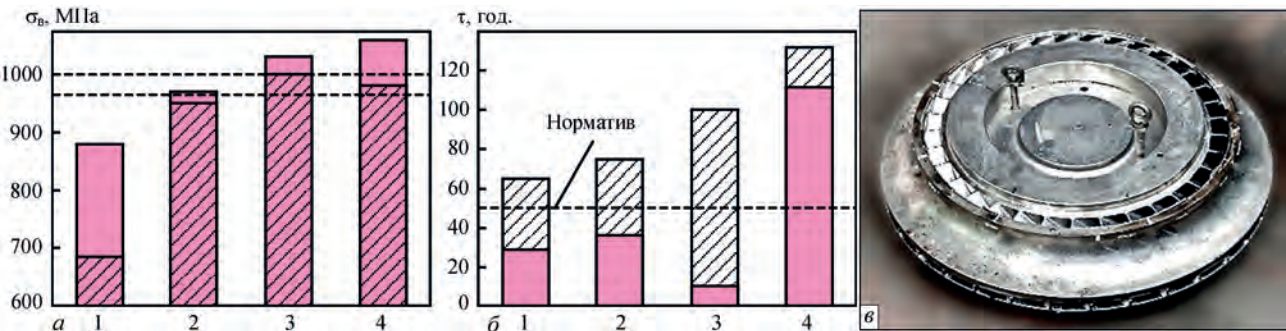


Рис. 11. Міцність на розтяг стикових паяних з'єднань (а), що отримані з застосуванням припоїв систем: Ni-Pd-Cr-Si (1); Ni-Pd-Cr-Co-Si (2); Ni-Pd-Cr-B (3); Ni-Pd-Cr-Ge (4); довготривала міцність (б); закрите відцентрове колесо осьового компресора газотурбінного двигуна (в)

валої міцності (132 год без руйнування) при температурі 550 °C і заданих напруженнях 785 МПа (рис. 11, б). Отримані дані довготривалої міцності перевищують більше ніж в 2 рази аналогічні дані, що отримані при застосуванні промислового припою. Дана технологія застосована при виготовленні закритого відцентрового колеса (рис. 11, в).

**Паяння інтерметалідних сплавів.** На сьогоднішній день можливості традиційних металевих сплавів з твердорозчинним і карбідним зміцненням практично вичерпані з точки зору радикального покращення властивостей, особливо для високотемпературного застосування. Деякий резерв на найближче майбутнє складають дисперсно-зміцнені, монокристалічні, евтектичні сплави. Підвищення температури в газотурбінних двигунах досягається за рахунок інтенсивного охолодження лопаток, що, в свою чергу призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії. Реальною альтернативою металевим сплавам є сплави на основі інтерметалідів, які призначені для високотемпературного застосування і сприяють розширенню області використання охолоджуваних лопаток із забезпеченням високої жароміцності без застосування покриття [14].

Створено припої та технологічний процес вакуумного високотемпературного паяння (ремонт) жароміцних нікелевих сплавів різних марок: ливарних сплавів (ЖС6У), перспективних жароміцних нікелевих сплавів на основі

інтерметаліду  $Ni_3Al$  (Ni-8Al-14Mo-0,05B), що експлуатуються в умовах високої температури, агресивного середовища і постійно діючих навантажень. Їх використовують для виготовлення окремих деталей і вузлів в гарячих трактах газотурбінних двигунів (рис. 12, а, б). Отримані паяні з'єднання з нікелевого сплаву на основі  $Ni_3Al$  характеризуються високою довготривалою міцністю в умовах підвищеної температури – 900 °C і постійно діючих напружень 150 МПа (рис. 12, в).

До класу перспективних інтерметалідних сплавів належать титанові сплави на основі TiAl. Вони є яскравими представниками високоміцних і жароміцних інтерметалідних сплавів нового покоління, які перспективні для використання в авіабудуванні при виготовленні ряду деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів. За жароміцними характеристиками при температурі 700...750 °C вони можуть конкурувати з високолегованими нікелевими сплавами завдяки низькій питомій вазі 3,8 г/см<sup>3</sup> (8,9 г/см<sup>3</sup> у нікелю). Це дозволить зменшити масу газотурбінного двигуна на 30 % і підвищити експлуатаційні характеристики. Класичним прикладом інтерметалідних титанових сплавів можна назвати Ti-48Al-2Cr-2Nb (ат. %), основною структурною складовою якого є упорядкована  $\gamma$ -фаза (TiAl), по межах якої виділяється незначна кількість  $\alpha_2$ -фази (Ti<sub>3</sub>Al) у вигляді пластинчастих зерен. Завдяки такій шаруватій структурі даний сплав має хороший баланс

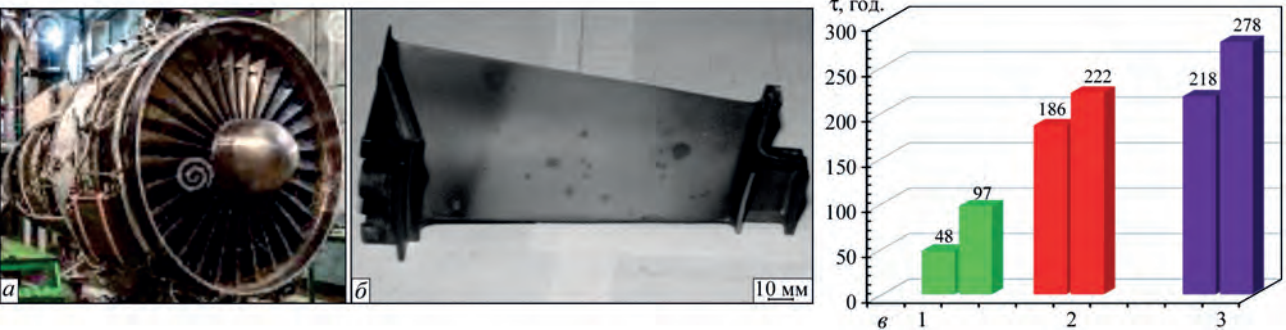


Рис. 12. Газотурбінний двигун (а), лопатка (б), довготривала міцність стикових однорідних паяних з'єднань  $Ni_3Al+Ni_3Al$ , що отримані з застосуванням багатокомпонентного нікелевого припою без термічної обробки (1), з термічною обробкою (2) та різнорідних з'єднань  $Ni_3Al+ЖС6У$  з термічною обробкою (3) (в)

пластичності при кімнатній температурі, міцність при високій температурі і стійкість до окислення. Сплави, в яких об'ємна частка  $\alpha_2$ -фази знаходиться на рівні 10...15 %, мають максимальний рівень пластичності [15]. Сплав  $\gamma$ -TiAl (47XD) має високу міцність як при кімнатній температурі (650...700 МПа), так і при підвищеній (при 700 °С, 320...350 МПа).

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона проведено дослідження по з'єднанню інтерметалідних титанових сплавів на основі  $\gamma$ -TiAl (Ti-45Al-2Nb-2Mn + 0,8 об. % TiB<sub>2</sub>) із застосуванням вакуумного нагріву і адгезійно-активних припоїв на базі системи титан-цирконій [16]. Отримані з'єднання успішно пройшли механічні випробовування на міцність при кімнатній, підвищеній температурі і показали хорошу довготривалу міцність при підвищеній температурі та постійно діючому напруженні.

**Паяння нержавіючої сталі.** Конструкції з нержавіючої сталі часто експлуатуються в умовах агресивних середовищ і підвищеної температури. Відпрацьовано технологічний процес вакуумного паяння нержавіючої сталі стосовно тонкостінних виробів: рулів ракет, гранчастих конструкцій [17], автомобільних теплообмінників (рис. 13).

Автомобільні теплообмінники з нержавіючої сталі (рис. 13, в, г) призначені для підтримки оптимального температурного режиму в автомобілях, тракторах, комбайнах та інших машинах.

В промисловості широко застосовуються паяні вузли зі сталей різних марок. Процес паяння можна виконувати у вакуумі, в середовищі захисних газів та на повітрі. Прикладом є паяний вузол з високоміцної аустенітної сталі і заглушок із сталі 45 (рис. 14), що характеризуються рівномірністю та застосовується в лабораторному стенді

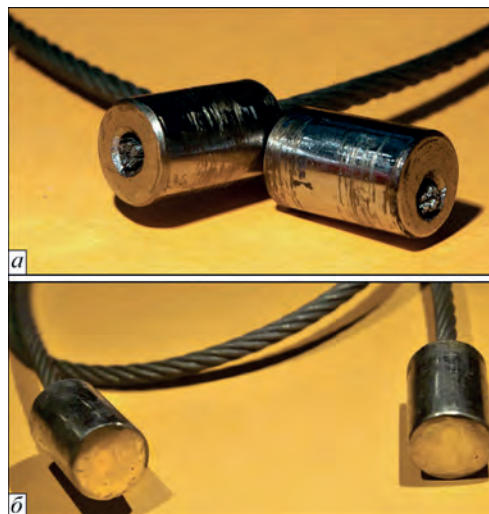


Рис. 14. Паяні елементи з високоміцної аустенітної сталі і сталі 45 до (а) та після паяння (б)

для випробування конструкцій рухомого складу (вагонів) на залізничному транспорті.

На особливу увагу заслуговують експерименти з паяння в космічному просторі: в умовах невагомості і значного перепаду температури, що впливають на процес утворення паяних з'єднань та суттєво відрізняються від земних умов. В цьому напрямку зроблено тільки перші кроки, а для більш детального вивчення фізико-металургійних особливостей формування паяних з'єднань необхідно проведення подальших систематичних досліджень.

## Висновки

В даній роботі коротко висвітлено деякі аспекти практичного застосування результатів досліджень і створених науково-технічних розробок в області паяння різних матеріалів: алюмінієвих, мідних, сталевих, жароміцних нікелевих, титанових сплавів і перспективних матеріалів нового покоління на основі інтерметалідів Ni<sub>3</sub>Al та  $\gamma$ -TiAl. Особливо слід відмітити значний об'єм експериментальних досліджень при отриманні паяних з'єднань, що призначені для експлуатації в жорстких умовах високої температури і постійно діючих напружень. Показано приклади застосування паяних з'єднань з різнорідних матеріалів, що відрізняються за фізико-хімічними властивостями і потребують комплексного підходу при виборі (розробці) хімічного складу припою і технологічного процесу паяння. Приведені в роботі практичні рішення мають велике значення для багатьох галузей промисловості та розширюють область застосування паяних конструкцій.

## Список літератури

1. Краснопевцева И. В. (2018) Технично-економические преимущества применения технологии пайки в машиностроении. *Пайка – 2018. Сборник материалов международной науч.-техн. конференции*. Тольятти, ТГУ, сс. 30–36.
2. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів. Підручник*. Хорунов В.Ф., Квасницький В. Ф. (редактори). Миколаїв, НУК.

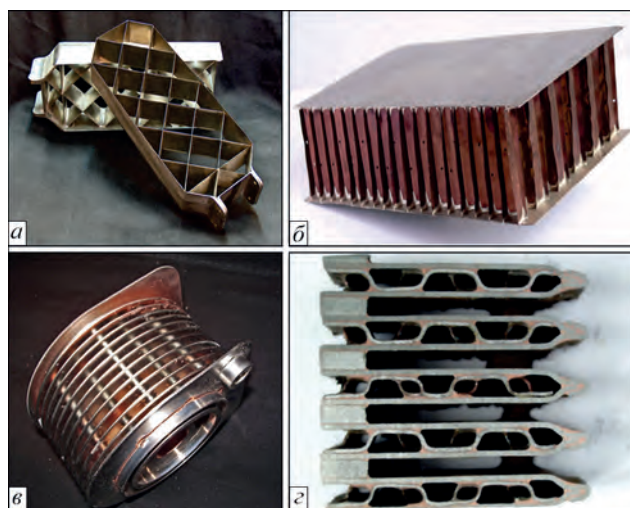


Рис. 13. Паяні тонкостінні конструкції з нержавіючої сталі: рулі ракет (а); пластинчатий теплообмінник (б); масляний радіатор для автомобільної промисловості: зовнішній вигляд (в) та вертикальний переріз (г)



3. Малый А.Б. (2008) Улучшение свариваемости сплава на никелевой основе ЧС-104 путем оптимизации режима термической обработки. *Автоматическая сварка*, **8**, 11–14.
4. Калинин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н. и др. (2005) Разработка и применение быстрозакаленных припоев для прецизионной пайки разнородных материалов атомной техники. *Вопросы атомной науки и техники*, **5(88)**, 150–156.
5. Максимова С.В. (2007) Аморфные припои для пайки нержавеющей стали и титана и структура паяных соединений. *Адгезия расплавов и пайка материалов*, **40**, 70–81.
6. Новосадов В.С. (2018) Физико-химические и реологические закономерности смачивания и растекания в металлургических системах. *Пайка – 2018. Сборник материалов международной науч.-техн. конференции*. Тольятти, ТГУ, сс. 101–120.
7. Пашков И.Н., Базлова Т.А., Баженов В.Е., Мисников В.Е. (2018) Исследование краевых углов смачивания припоями на никелевой основе на подложках из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т и жаропрочного сплава ВЖ-159. *Пайка – 2018. Сборник материалов международной науч.-техн. конференции*. Тольятти, ТГУ, сс. 157–165.
8. Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. (2013) Brazing of aluminium and aluminium to steel. *Advances in brazing. In: Science, technology and applications*. UK, WPL, Oxford Cambridge, 249–279.
9. Хорунув В.Ф., Максимова С.В., Стефанів Б.В. (2010) Изготовление буровых долот для добычи рассеяного метана в шахтных выработках. *Автоматическая сварка*, **6**, 48–51.
10. (2020) <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/1023-de-laem-prostoj-solnechnyj-kollektor-svoimi-rukami-poshagovaya-instruktsiya>.
11. Rabinkin, A. (2013) *Advances in brazing. In: Science, technology and applications*. UK, WPL, Oxford Cambridge, 121–159.
12. Малащенко И.С., Куренкова В.В., Белявин А.Ф., Трохимченко В.В. (2006) Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием борсодержащего припоя с присадкой кремния. *Современная электрометаллургия*, **4**, 26–42.
13. Arafina, M.A., Medraja, M., Turner, D.P., Bocher, P. (2007) Transient liquid phase bonding of Inconel 718 and Inconel 625 with BNi-2: Modeling and experimental investigations. *Mater. Sci. & Engin.: A.*, **447(1-2)**, 125–133.
14. Каблов Е.Н., Лукин В.И. (2008) Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники. *Автоматическая сварка*, **11**, 76–82.
15. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
16. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V. (2013) Brazing of superalloys and the intermetallic alloy ( $\gamma$ -TiAl). *Advances in brazing. In: Science, technology and applications*. WPL, Oxford Cambridge, 85–120.
17. Хорунув В.Ф. (2008) *Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей*. Киев, Наукова думка.
1. Krasnopevtseva, I.V. (2018) Technical and economical advantages of application of brazing technology in mechanical engineering. *In: Proc. of Int. Conf. on Brazing -2018*. Tolyatti, TGU, 30–36.
2. Yermolayev, G.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi V.F. et al. (2015) *Brazing of materials: Manual*. Ed. by V.F. Khorunov, V.F. Kvasnytskyi. Mukolaiv, NUK [in Ukrainian].
3. Maly, A.B. (2008) Improvement of ChS-104 nickel-base alloy weldability by optimization of heat treatment mode. *The Paton Welding J.*, **8**, 7–10.
4. Kalin, B.A., Fedotov, V.T., Sevryukov, O.N. et al. (2005) Development and application of rapid quenched filler metals for precision brazing of dissimilar materials of nuclear engineering. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki*, **5(88)**, 150–156 [in Russian].
5. Maksymova, S.V. (2007) Amorphous filler metals for brazing of stainless steel and titanium and structure of brazed joints. *Adgeziya Rasplavov i Pajka Materialov*, **40**, 70–81 [in Russian].
6. Novosadov, V.S. (2018) Physicochemical and rheological principles of wetting and flowing in metallic systems. *In: Proc. of Int. Conf. on Brazing -2018*. Tolyatti, TGU, 101–120.
7. Pashkov, I.N., Bazlova, T.A., Bazhenov, V.E., Misnikov, V.E. (2018) Study of limiting wetting angles with nickel-based brazing filler metals on substrate from corrosion-resistant steel 12Kh18N10T and heat-resistant alloy VZh-159. *In: Proc. of Int. Conf. on Brazing -2018*. Tolyatti, TGU, 157–165.
8. Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. (2013) Brazing of aluminium and aluminium to steel. *Advances in brazing. In: Science, technology and applications*. UK, WPL, Oxford Cambridge, 249–279.
9. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V., Stefaniv, B.V. (2010) Manufacture of drill bits for production of dispersed methane in mine working. *The Paton Welding J.*, **6**, 41–43.
10. (2020) <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/1023-de-laem-prostoj-solnechnyi-kollektor-svoimi-rukami-poshagovaya-instruktsiya>.
11. Rabinkin, A. (2013) *Advances in brazing. In: Science, technology and applications*. UK, WPL, Oxford Cambridge, 121–159.
12. Malashenko, I.S., Kurenkova, V.V., Belyavin, A.F., Trokhimchenko, V.V. (2006) Short-term strength and microstructure of brazed joints of alloy VJL12U produced using boron-containing brazing alloy with addition of silicon. *Advances in Electrometall.*, **4**, 23–38.
13. Arafina, M.A., Medraja, M., Turner, D.P., Bocher, P. (2007) Transient liquid phase bonding of Inconel 718 and Inconel 625 with BNi-2: Modeling and experimental investigations. *Mater. Sci. & Engin.: A.*, **447(1-2)**, 125–133.
14. Kablov, E.N., Lukin, V.I. (2008) Intermetallics based on titanium and nickel for advanced engineering products. *The Paton Welding J.*, **11**, 65–70.
15. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties: Refer. book*. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
16. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V. (2013) Brazing of superalloys and the intermetallic alloy ( $\gamma$ -TiAl). *Advances in brazing. In: Science, technology and applications*. WPL, Oxford Cambridge, 85–120.
17. Khorunov, V.F. (2008) *Fundamentals of brazing of thin-walled structures from high-alloyed steels*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

## References

## BRAZING AS A PROMISING METHOD OF PRODUCING PERMANENT JOINTS

S.V. Maksymova

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents practical results of developments and investigations in the field of brazing various materials: aluminium, copper, high-temperature nickel and titanium alloys, as well as promising materials based on Ni3Al and  $\gamma$ -TiAl intermetallics, and steels of different grades. Data on reactive-flux brazing of aluminium thin-walled structures in a controlled gas environment are given. A lot of attention is paid to producing brazed joints from dissimilar materials: Mo+C (stainless steel), W+Cu, hard alloy material (VK 20)+steel, Al+steel, etc. Effective application of the developed technologies of brazing high-temperature nickel and titanium alloys in fabrication of critical structures for high temperature applications and results of mechanical testing of brazed joints are shown. The developed brazing filler metal and technologies of high-temperature vacuum brazing were applied to produce joints from new generation alloys based on nickel and titanium aluminides, which have been successfully tested for long-term strength under the conditions of higher temperature and continuously applied stresses. 17 Ref., 1 Tabl., 14 Fig.

**Keywords:** brazed joints, brazing filler metals, vacuum, reactive-flux, gas-flame brazing, high-temperature nickel, titanium alloys, long-term strength, dissimilar materials, aluminium, copper alloys

Надійшла до редакції 11.02.2020



## 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 м<sup>2</sup>, оснащеного порталним краном вантажопідйомністю 5/30 т дозволяє здійснювати складання та налагодження установок для ЕПЗ з об'ємом вакуумних камер до 100 м<sup>3</sup>. 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 зливочний піддається візуальному та ультразвуковому контролю якості.



Електронно-променева установка YE5812



Універсальна електронно-променева установка YE5810



Електронно-променева установка YE121

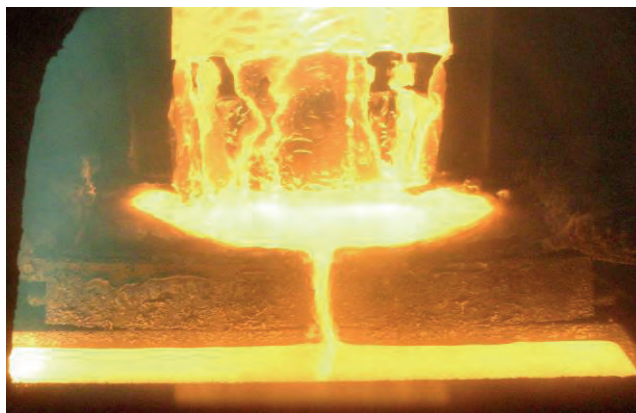


Електронно-променеві гармати «Патон-300»





Переплав брикетів губчастого титану в зливки діаметром 400 мм Grade 2



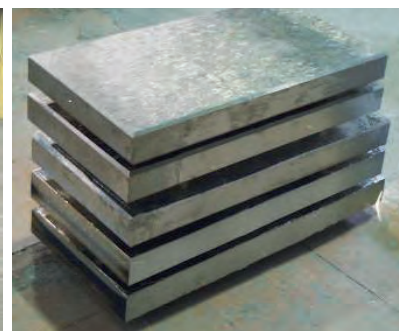
Виплавка зливка-сляба 165×950×2500 мм титанового сплаву ПТ-3В



Зливки титану діаметром 100...600 мм



Зливки 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.

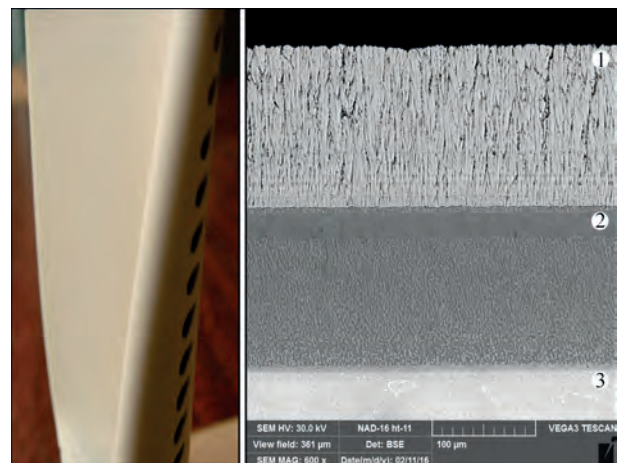
Розроблені у МЦ ЕПТ технології для нанесення градієнтних захисних покриттів забезпечують вищий ступінь повторюваності складу, структури та довговічності порівняно із покриттями, які отримуються за традиційною багатоступінчатою технологією. Наприклад, градієнтні термобар'єрні покриття типу  $\text{NiCoCrAlY(AlCr)/YSZ}$  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  $\text{NiCoCrAlY}$  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



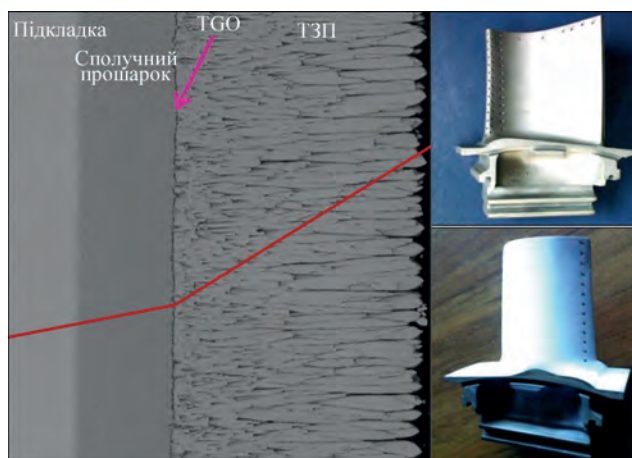


Рис. 2. Теплозахисне покриття та вид робочих лопаток із металевим та керамічними покриттями

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 напыленням в кисневмісному середовищі (HVOF), плазмового напылення 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

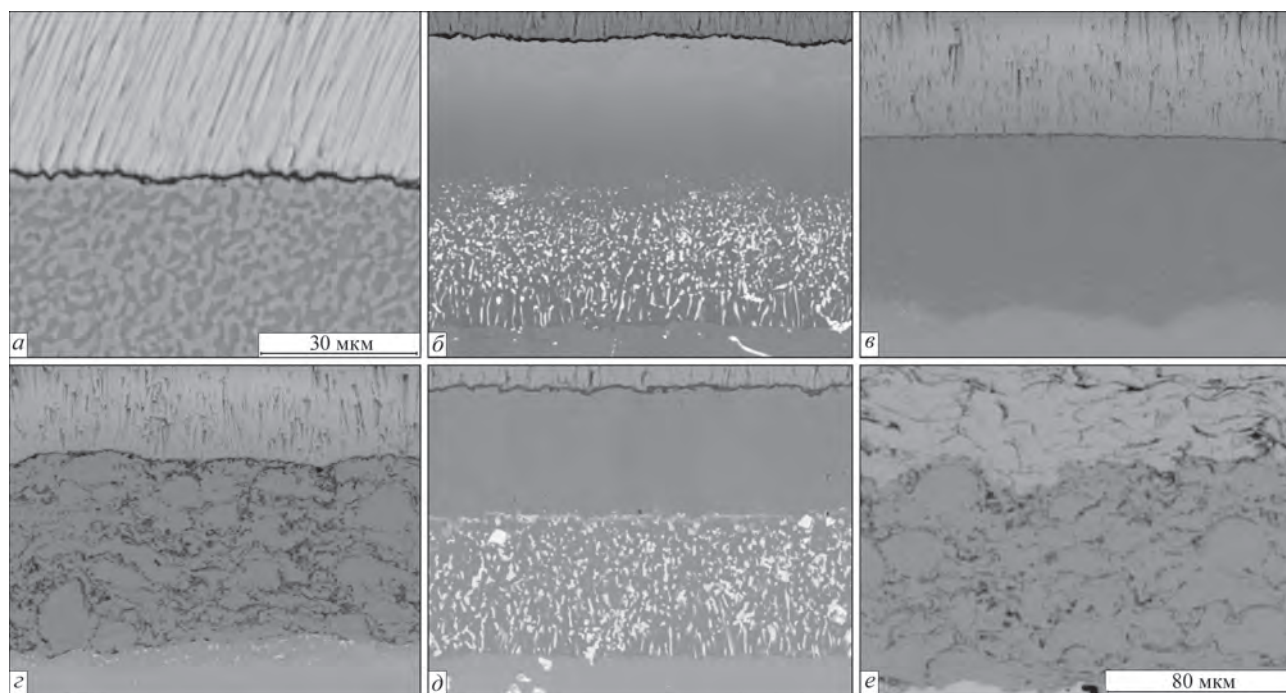


Рис. 3. Різні типи сполучних прошарків у теплозахисних системах покриттів, отриманих електронно-променевим осадженням у вакуумі (EB-PVD) (а – д) та плазмовим напыленням на повітрі (APS). а – EB-PVD; б – PtAl; в – LPPS; г, е – HVOF; д – NiAl

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 газофазного 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  $\text{NiCoCrAlY (+Hf, Si)}$  (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

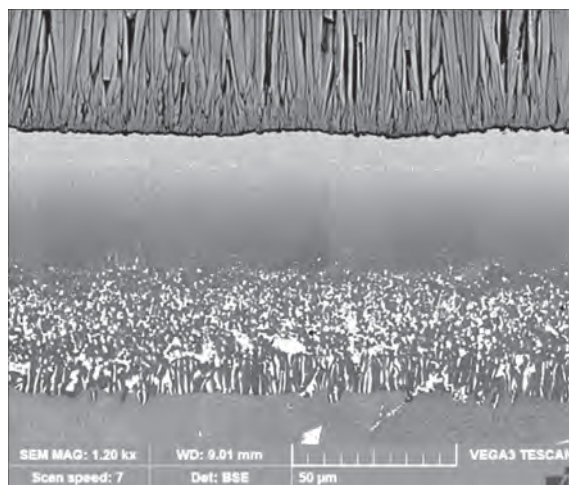


Рис. 4. Структура платино-алюмінідного покриття, сформованого як сполучний прошарок у системі теплозахисного покриття, нанесеного методом EB-PVD

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.

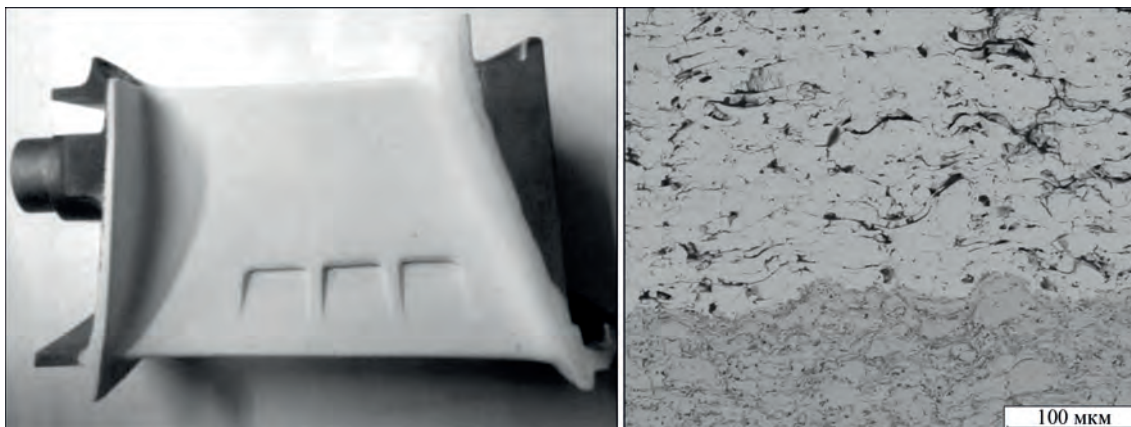


Рис. 5. Лопатка з теплозахисним покриттям, отриманим методами HVOF/APS та структура міжфазної межі металевого (HVOF) та керамічного (APS) прошарків системи ТЗП

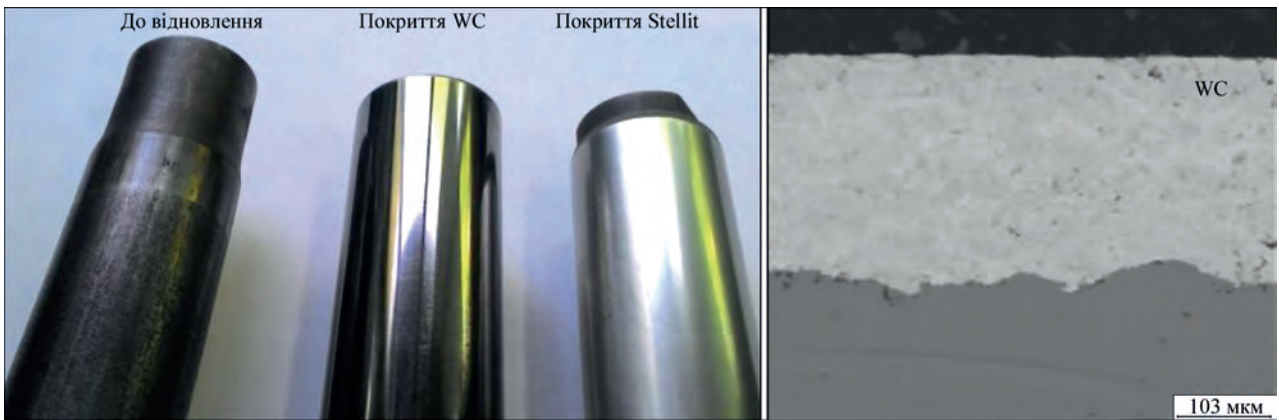


Рис. 6. Загальний вигляд валу після відпрацювання, відновлення з нанесенням зносостійких покриттів типу WC та Stellite та мікроструктура покриття WC

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,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , 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 очистки 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

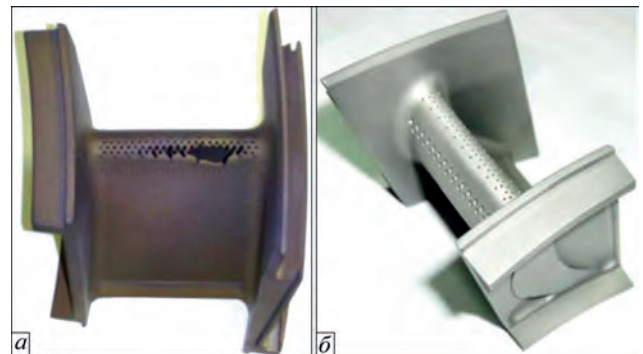


Рис. 7. Загальний вигляд соплової лопатки після напрацювання з розгаром на вхідній кромці (а) та після відновлення для подальшої експлуатації (б)

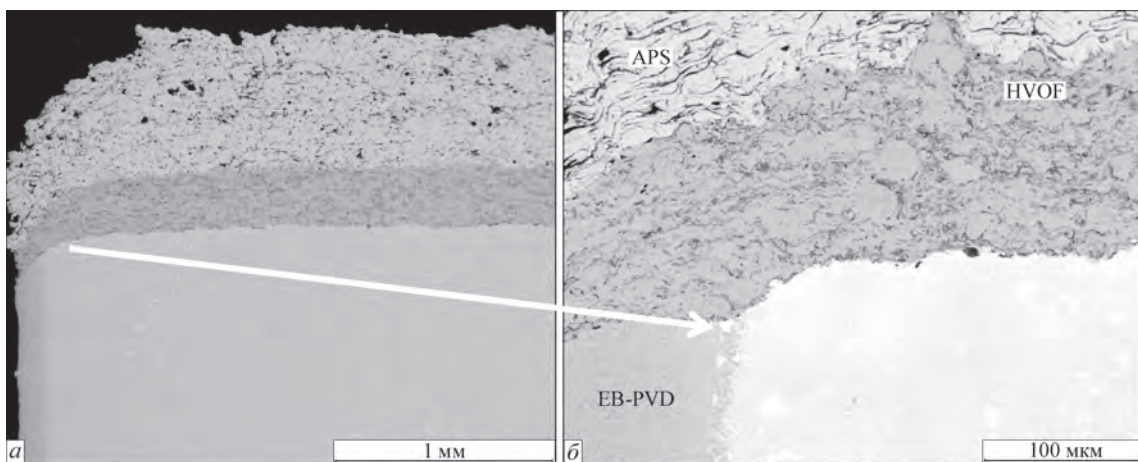


Рис. 8. Поєднання різних типів покриттів на торці пера робочої лопатки енергетичної турбіни; а – фрагмент пера лопатки; б – межа поєднання двох типів захисних та теплозахисного покриттів



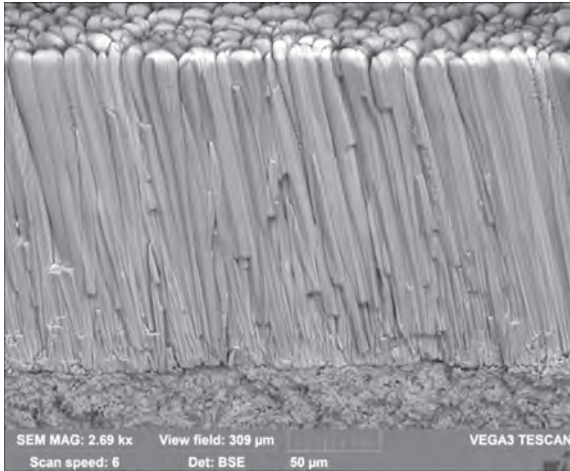


Рис. 9. Класична стовпчаста структура теплозахисного покриття, отриманого електронно-променевим осадженням у вакуумі

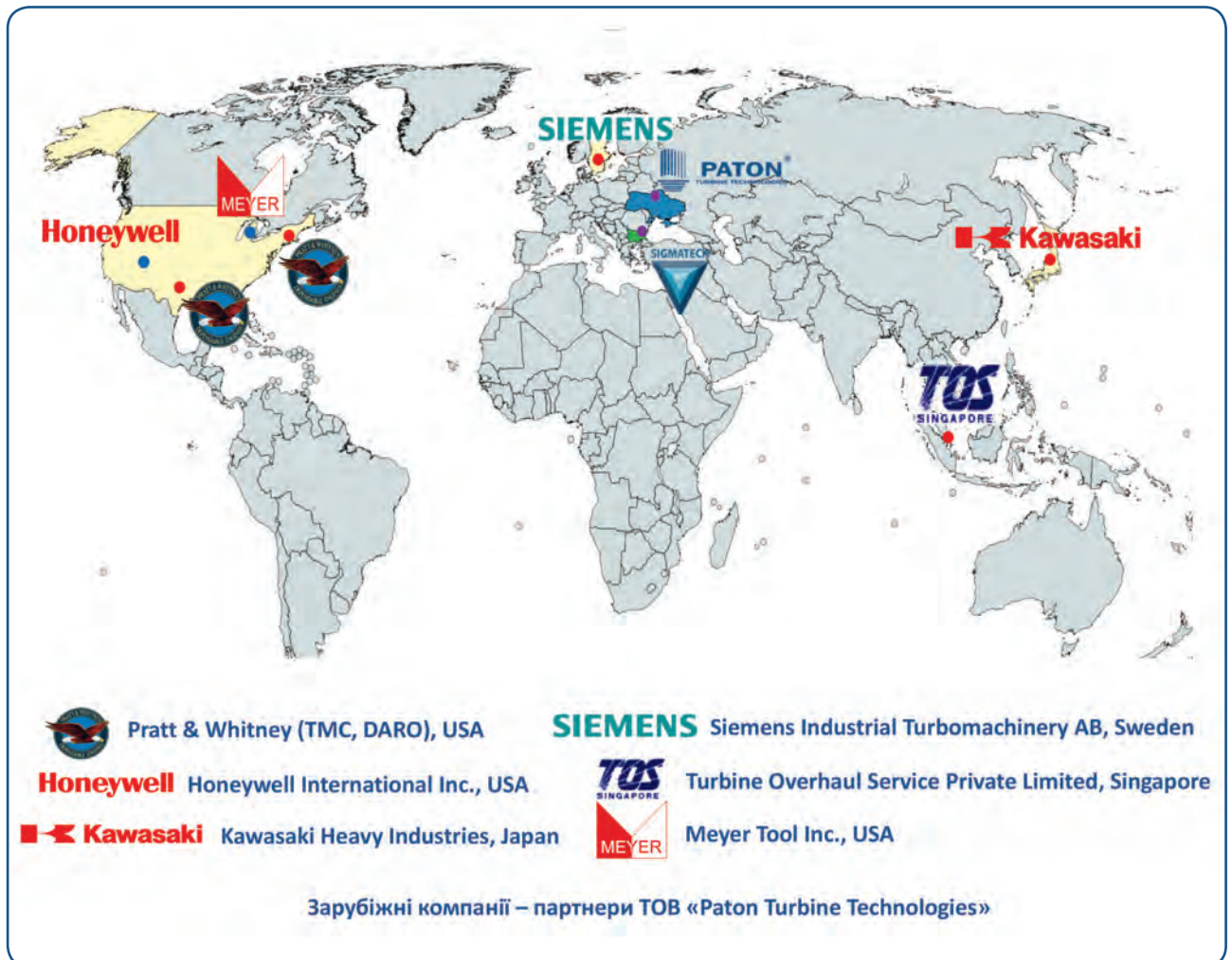
газотурбінних установок ГТК 10-4, ГТК 10И, MS 3002, ДР-59 та ін.

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.

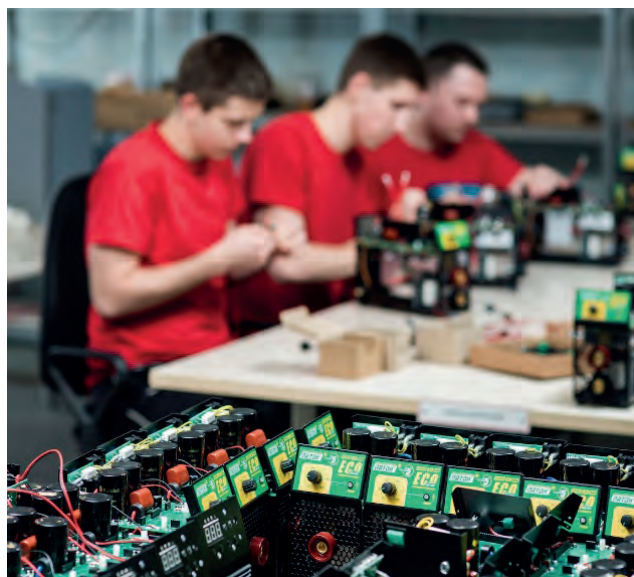
ТОВ «Paton Turbine Technologies» — це приклад вдалої адаптації та запровадження досягнень фундаментальної науки у виробництво, розвитку сучасних технологій, руху до майбутнього з урахуванням актуальних потреб суспільства.



## ДОСЛІДНИЙ ЗАВОД ЗВАРЮВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

1 січня 1959 р. був заснований Дослідний завод зварювального устаткування ІЕЗ ім. Є.О. Патона, основним завданням якого були відпрацювання технології виробництва та виготовлення дослідних зразків новітнього зварювального устаткування, що розроблялось в ДКТБ та інших структурних підрозділах ІЕЗ ім. Є.О. Патона. З цієї миті і починається безперервний рух Заводу у бік визначеного лідерства в області виробництва сучасного зварювального устаткування та матеріалів.

За більш ніж 60 років своєї історії колективом Дослідного заводу було зроблено сотні тисяч одиниць зварювального устаткування, в яких, свого часу, було втілено новітні розробки вітчизняних учених з сфери технологій зварювання, наплавлення та різання металів. Зроблене Заводом устаткування використовувалося і часто продовжує використовуватися в максимально широкому спектрі умов в різних куточках світу: від глибоководного зварювання об'єктів для нафто- та газодобування, до перших в історії зварювальних робіт в умовах відкритого космосу; від ремонту кораблів в умовах жаркого екваторіального або вологого тропічного клімату до зварювання трубопроводів в умовах крайньої півночі. Усе це допомогло здобути цінний досвід, який забезпечив міцний фундамент для зайняття Заводом лідерських позицій на цьому ринку – сьогодні ДЗЗУ є єдиним заводом в Україні, здатним виготовляти зварювальне устаткування з струмами зварювання від 150 А для побутових споживачів до 10000 А для гігантів української та світової промисловості.



Сьогодні асортимент продукції Заводу налічує більше 60 позицій, з яких більше 30 моделей інверторного зварювального устаткування, більше 15 моделей класичного устаткування та більше 10 марок зварювальних електродів.

Інверторні зварювальні апарати ПАТОН™ займають більшу частину в загальному обсязі виробництва устаткування ДЗЗУ. Вони серійно виробляються в наступних категоріях:

- випрямлячі інверторні (зварювальні струми від 150 до 500 А, працюють від мереж живлення 220 В/380 В);
- апарати для напівавтоматичного зварювання (зварювальні струми від 160 до 500 А, працюють від мереж живлення 220 В/380 В);
- апарати для аргондугового зварювання (зварювальні струми від 5 до 315 А, працюють від живлячих мереж 220 В/380 В);
- мультифункціональні цифрові інвертори (зварювальні струми від 250 до 350 А, працюють від мереж живлення 220 В/380 В);
- апарати повітряно-плазмового різання.

Для максимально повної відповідності вимогам ринку більшість апаратів асортиментного ряду інверторного обладнання випускаються в декількох серіях: апарати загальнопромислового виконання і апарати професійної серії, що дозволяють проводити зварювання в особливо напружених умовах роботи.

Також на вимогу постійно зростаючих запитів споживачів Завод активно працює над розширенням асортименту і модернізацією існуючих моделей. За останній рік завершена розробка та запускання у виробництво інверторні випрямлячі та напівавтомати з номінальним зварювальним струмом до 500 А та аргондуговий інвертор для зварювання як постійним, так і змінним струмом до 315 А. Уже у 2020 р. прийнято рішення замінити моделі апаратів зі струмами 315 та 250 А, які живляться від трифазної мережі, більш потужними моделями на 350 і 270 А відповідно. На фінальному етапі знаходиться розробка нової перспективної моделі апарату для повітряно-плазмового різання з номінальним струмом до 100 А.

У виробництві апаратів використовуються найсучасніші та високоякісні компоненти від провідних світових виробників: INFINEON, VISHAY, KENDEIL, NXP, а апарати професійної серії ком-



плектуються аксесуарами від відомого німецького виробника – компанії Abicor Binzel. Все це дозволяє Заводу випускати продукцію «екстра-класу», найвищу якість якої відображено в збільшеному терміні гарантійного обслуговування до 5 років.

Зварювальні електроди ПАТОН™ також займають значну частину в загальній структурі виробленої Заводом продукції. На сьогоднішній день виготовляється 12 марок зварювальних електродів як за класичною, так і за поліпшеною рецептурами. А з огляду на різноманітність діаметрів і варіантів упаковки, кількість асортиментних позицій по даній категорії товарів перевищує 50. У виробництві застосовуються сучасні технології та жорсткий вхідний контроль якості сировини, а професійна команда фахівців постійно стежить за розвитком виробництва зварювальних матеріалів з метою своєчасного впровадження інновацій.

Зварювальні електроди ПАТОН™ відповідають всім необхідним вимогам до продукції такого виду і регулярно проходять сертифікацію відповідними українськими та міжнародними сертифікаційними центрами. У 2018 р. дана продукція була сертифікована на відповідність вимогам норм ЄС і було розпочато регулярні поставки електродів на ринки європейських країн, а у 2019 р. отримано сертифікат, який підтвердив відповідність виробничого процесу високим вимогам стандарту ISO 9001: 2015.

Даний напрямок роботи ДЗЗУ активно розвивається – сьогодні на завершальній стадії знаходиться процес організації нового майданчика з виробництва зварювальних електродів ПАТОН™ у м. Києві. Після закінчення пусконаладжувальних робіт кілька виробничих ліній нового майданчика зможуть забезпечити виробництво до 600 т зварювальних електродів щомісяця. Крім виробничих відділень до складу нового комплексу виробництва зварювальних електродів у

Києві входить аналітична лабораторія, лабораторія механічних випробувань і відділення зварювально-технологічних випробувань. Комплект лабораторного обладнання дозволяє виконувати комплексний вхідний контроль всіх сировинних матеріалів, контролювати технологічний процес виготовлення електродів і виконувати приймально-здавальні випробування кожної партії готової продукції. У найближчому майбутньому планується запуск лінії дослідних прес-форм для розробки нових марок електродів з поліпшеними зварювально-технологічними властивостями.

Важливо відзначити, що вже зараз значна частина продукції ПАТОН™ поставляється на експорт і саме цей вектор визначено в якості одного з основних в стратегії розвитку Заводу. За останній рік кількість країн, на ринки яких організовано поставки продукції, збільшилася до 30. Зокрема, у 2019 р. були організовані поставки зварювальних апаратів і електродів в Індію, Шрі-Ланку, Єгипет, Туреччину та Буркіна-Фасо. На різних стадіях завершення знаходяться переговори про початок поставок ще у 14 країн, серед яких варто відзначити європейські країни – Іспанія, Хорватія, Македонія, Болгарія; близькосхідні країни – Саудівська Аравія, Пакистан, Ізраїль, а також азійські країни – Філіппіни та Сінгапур. З огляду на такий високий інтерес до продукції Заводу, можна констатувати той факт, що висока надійність, широка функціональність, а також багато в чому унікальні технічні характеристики дають можливість зварювальному обладнанню ПАТОН™ успішно конкурувати з продукцією провідних світових виробників на ринках різних країн по всьому світу.

Саме вибір продукції ПАТОН™ з боку як вітчизняних, так і іноземних зварників дає привід колективу Дослідного заводу зварювального устаткування ІЕЗ ім. Є.О. Патона пишатися своєю роботою і заряджає на нові звершення!





## ДОСЛІДНИЙ ЗАВОД ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

У листопаді 1977 р. урядом України прийнято рішення про передачу електродного виробництва Київського зварювально-електродного заводу до Інституту електрозварювання з метою подальшого розвитку науково-дослідних та експериментальних робіт по створенню нових зварювальних матеріалів і технології їх промислового виробництва.

З січня 1978 р. Дослідний завод зварювальних матеріалів входить до складу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона АН УРСР. З цього часу завод спеціалізується тільки на випуску зварювальних матеріалів, в тому числі експериментальних марок. З цією метою проводиться повна реконструкція заводу.

В кінці 1970-х років здійснено реконструкцію старого обпресувального відділення фтористо-кальцієвих електродів, в результаті чого звільнені виробничі площі для створення потужностей з виробництва плавлених і керамічних флюсів, припоїв, литих наплавлювальних кілець, закінчується монтаж обладнання флюсоплавильної ділянки і введення у 1980 р. її в експлуатацію. Потужності з випуску плавлених флюсів доводяться до 150 т на рік. Крім того, на ділянці відпрацьовується технологія виробництва нових розробок зварювальних матеріалів відділу Інституту електрозварювання.

У 1980 р. на заводі введено в експлуатацію ділянку по виготовленню відливків кілець для наплавлення клапанів двигунів внутрішнього згоряння, закінчується будівництво виробничої будівлі площею 1800 м<sup>2</sup>. У цій будівлі у 1980–1984 рр. встановлені і змонтовані чотири механізовані лінії для виготовлення порошкового дроту зі сталеві стрічки. До 1985 р. потужність ділянки з виробництва порошкових дротів доведена до 1000 т на рік.

За розробками ряду відділів ІЕЗ ім. Є.О. Патона завод розпочав виробництво значної кількості марок порошкового дроту, призначених для механізованого та автоматичного зварювання конструкцій з вуглецевих, низьколегованих та високолегованих сталей, що використовуються в різних галузях. Крім того, освоюється виробництво порошкових стрічок і дротів для автоматичного наплавлення різних деталей.

До початку 1980-х років побудована друга виробнича ділянка площею 1800 м<sup>2</sup>. У цій будівлі в наступні роки були розміщені допоміжні служби заводу, а також металорізальні та інші верстати для ремонту існуючого технологічного обладнання, виготовлення нового обладнання і пристосувань. Встановлюється нова механізована лінія і освоюється технологія різання сталеві стрічки. На підготовчій ділянці монтуються та впроваджуються у виробництво нові кульові млини з безперервним просівом для розмелювання різних компонентів, для розширення виробництва електродів марки АНО-21 проводиться реконструкція та переобладнання існуючої механізованої лінії, що включає електрообмазувальні агрегати і конвеєрну піч для випуску на ній електродів діаметром 2,5 та 3,0 мм.

У 1982–1984 рр. проводиться повна реконструкція скловарного відділення електродного цеху. Встановлено нові автоклави ємністю 3 м<sup>3</sup>, розроблено на заводі та змонтовано устаткування та арматура для якісного поліпшення характеристик рідкого скла, очищення його від домішок і стабілізації властивостей, в результаті істотно підвищилась якість виготовлених електродів.

У 1983–1984 рр. вводиться в експлуатацію ділянка по виготовленню безсрібних припоїв для пайки міді та її сплавів. Потужність ділянки в на-





ступні роки доведена до 1 т припоїв на рік. Випуск ряду марок безсрібних припоїв дозволив значно зменшити витрати дорогоцінного металу – срібла.

В кінці 1980-х років завод випускав 32 марки електродів, 40 марок порошкових дротів для зварювання та наплавлення, 25 марок плавлених і керамічних флюсів.

Одним з досягнень заводу є створення і введення в експлуатацію у 1998–1999 рр. нового цеху по переробці сировинних матеріалів. Були встановлені дві нові електричні обертові барабани печі і камерна піч для сушіння компонентів, шокова дробарка СМД-108 та дві шокові дробарки С-182Б, десять реверсивних млинів періодичної дії власної конструкції і виготовлення, чотири млини з безперервним просівом. Кожен млин укомплектований віброситом СВ 2-09. Для контрольного просіву матеріалів, що надходять на завод в меленому вигляді, встановлені два вібросита СВ 2-09. Почала діяти механізована лінія дозування компонентів шихти в цеху спецелектродів, яка дозволила замінити ручне дозування.

Завдяки впровадженню нового і постійної модернізації діючого технологічного обладнання, що виробляє зварювальні електроди та інші матеріали для зварювання, а також завдяки високій кваліфікації колективу підприємство не тільки вижило в період становлення ринкової економіки, а й зайняло одне з провідних місць на ринку зварювальних матеріалів України.



У 2003 р. введено в експлуатацію нове відділення приготування та брикетування обмазувальної маси в цеху по виготовленню електродів загального призначення з рутиловим покриттям.

У 2005 р. модернізовано лінії з виробництва порошкового дроту. Було виготовлено та змонтовано нове обладнання для підготовки сталевих стрічки, реалізована двостадійна схема волочіння дроту, виготовлений на заводі і змонтований на ділянці перемотувальний верстат для рядної намотки готового дроту, виробництво укомплектовано необхідним обладнанням для роботи з великовантажними котушками. Модернізація дозволила налагодити випуск порошкового дроту малих діаметрів (1,2...1,6 мм) та її рядне намотування на каркасні барабани ємністю до 16 кг.

Одним з ефективних інструментів підвищення якості продукції є стандарти ISO серії 9000, які втілюють сучасний комплексний підхід у вирішенні питань, пов'язаних з якістю продукції. Тому у липні 2007 р. на заводі була впроваджена Система управління якістю на відповідність вимогам ISO 9001: 2000.

Спеціалізована випробувальна лабораторія заводу оснащена сучасним обладнанням, приладами та методиками, необхідними для виконання вхідного контролю сировинних матеріалів, поточного контролю технологічних процесів й приймально-здавальних випробувань готової продукції (зварювальних електродів, порошкового дроту, флюсу). Випробувальна лабораторія акредитована на технічну компетентність Національним агентством з акредитації України та має атестат акредитації, а також технічну компетенцію відповідно до вимог Російського Морського Регістру Судноплавства.

В даний час завод має виробничі потужності, які дозволяють щорічно виготовляти 12 тис. т електродів загального і спеціального призначення, 500 т порошкового дроту, по 150 т плавлених і керамічних флюсів, і є одним з провідних підприємств з виробництва зварювальних матеріалів в Україні та країнах СНД. В умовах високої конкуренції на ринку заводом вживаються всі заходи для досягнення першості у виробництві зварювальних матеріалів за показниками якості і цінової політики, гарантуючи тим самим стійку перспективу розвитку.

Традиційний девіз

ДП «ДЗЗМ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ» —  
«Головний контролер нашої продукції – споживач»

<http://paton-ozsm.com.ua>



## ДОСЛІДНИЙ ЗАВОД СПЕЦЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

За ініціативи академіка Б.Є. Патона в ІЕЗ ім. Є.О. Патона були проведені дослідження та експериментальні розробки з виявлення можливості використання зварювальних джерел нагрівання для одержання металів і сплавів особливо високої якості і надійності, на основі яких сформувався новий науковий напрям у діяльності Інституту – спеціальна електрометалургія. У 1984 р. почало свою роботу Державне підприємство «Дослідний завод спецелектрометалургії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України».

Сьогодні завод є сучасним підприємством з виробництва відповідальних відливок, що працюють в агресивних середовищах, відрізняються високою експлуатаційною надійністю. Завод також займається впровадженням на підприємствах України прогресивних технологій литва деталей з високими експлуатаційними якостями, а також є лідером по виробництву корпусів вакуумного устаткування для електронно-променевих технологій зварювання або покриття різноманітних матеріалів та поверхонь.

Основними напрямками діяльності заводу стали виробництво литва по газифікованим моделям, а також повний цикл механічної обробки деталей і збірки вакуумних камер.

Лиття точних деталей за газифікованими моделями з пінополістиролу на виробничих площах і устаткуванні ДП «Дослідний завод спецелектрометалургії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» дає можливість виготовляти якісні відливки вагою до 250 кг. При цьому матеріал відливок може бути

найрізноманітніший: сталь, високоміцні марки чавуну, різні марки бронзи та інші сплави кольорових і чорних металів. Точність виконання відливок забезпечується застосуванням нероз'ємної форми з мінімального числа частин, а також, мінімізації кількості стрижнів.

Продукція, що виготовляється заводом, дозволяє забезпечити високу якість виконання технологічного процесу зварювання та електронного напилення при роботі з тугоплавкими і хімічно активними, різноманітними речовинами і якісними сплавами.

Наявне на заводі обладнання, накопичений науково-технічний потенціал і оригінальні власні розробки дають можливість на вимогу замовника розробити і виготовити необхідне оснащення, що дозволяє виробляти з високою точністю і конструкційною надійністю зварювання та електронно-променеве покриття деталей з різними механічними і фізико-хімічними властивостями.

Підприємство також має у своєму розпорядженні спеціальне обладнання і необхідний досвід, що дозволяє проектувати і виготовляти алюмінієві прес-форми для литва точних деталей по моделях, що газифікуються. Використання сучасних технологій та високопродуктивного обладнання з ЧПУ, власних напрацювань і оригінального програмного забезпечення дозволяє виконувати замовлення на виготовлення прес-форм практично будь-якої складності в найкоротші терміни, з належною якістю і високою експлуатаційною надійністю.

[dzse.com.ua](http://dzse.com.ua)







## ДОСЛІДНЕ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ БЮРО ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

У 1957 р. Рада Міністрів УРСР видала постанову, якою було передбачено організацію Дослідно-конструкторського бюро Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона на засадах господарського розрахунку. Це сприяло реалізації ідеї Є.О. Патона про структуру Інституту за схемою «лабораторії – конструкторське бюро – дослідне виробництво».

З моменту заснування ДКБ його очолив д.т.н. А.І. Чвертко – досвідчений конструктор, талановитий організатор, що незмінно керував колективом протягом 27 років. В подальшому колектив ДКБ очолювали В.Ф. Мошкін, С.І. Притула, В.С. Романюк і в теперішній час Г.В. Жук.

В тісному співробітництві учених і спеціалістів ІЕЗ, колектива ДЗЗУ, провідних підприємств України ДКБ протягом 60 років створено обладнання для різних механізованих способів зварювання, впроваджено у виробництво завершені науково-дослідницькі розробки.

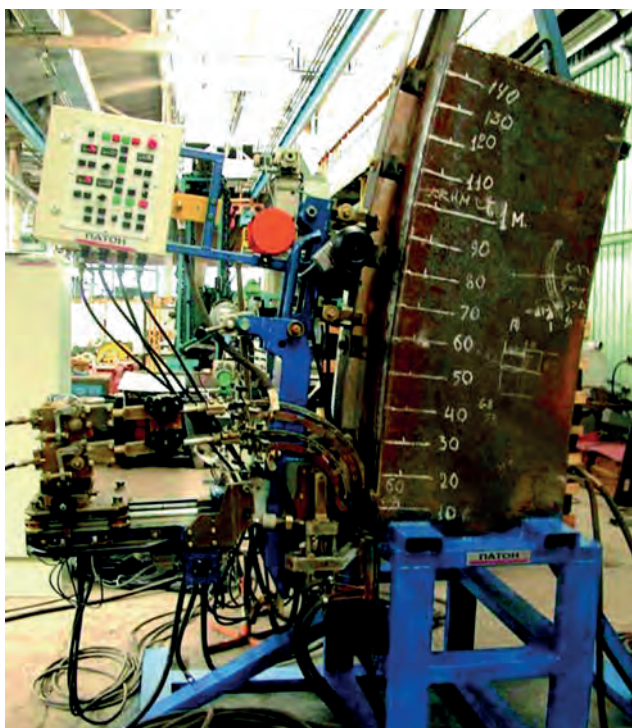
Важливо відмітити – з часу організації ДКБ крім конструкторської розробки нової зварювальної техніки для різних способів зварювання і створення способів механізації і автоматизації зварювальних процесів виконувався і продовжує виконуватись також значний обсяг робіт технологічного характеру по відпрацюванню техніки і технології зварювання.

Колектив ОКБ продовжує творчу працю зі створення нових технологій і зразків зварювального обладнання, якому знаходиться застосування практично в усіх галузях промисловості, металургії, будівництві, при підводних роботах і навіть в медицині.

Сьогодні пріоритетними напрямками діяльності сучасного ДКБ є розробка обладнання та технології для автоматичного і механізованого дугового MIG/MAG зварювання з імпульсними алгоритмами роботи. У цьому напрямку розроблено обладнання з дозованою подачею наплавного порошкового дроту для наплавлення біметалевих листів на підприємстві Стіл Ворк. Спільно з компанією Geniwel (Південна Корея) проводяться роботи з розробки технології дозованої подачі зварювального дроту для зварювання нікелевих сталей з вмістом нікелю 9 % при виробництві танкерів і терміналів на замовлення компанії Hyundai. В рамках програми HORIZON 2020 за проектом i-Weld в складі міжнародного консорціуму «Великобританія, Туреччина, Польща, Швеція, Малайзія, Україна», ДКБ проводяться роботи з оптимізації керування технологічними процесами при дуговому автоматичному та напівавтоматичному







будівництві при спорудженні сталевих конструкцій в монолітному будівництві, в містобудуванні, енергетиці.

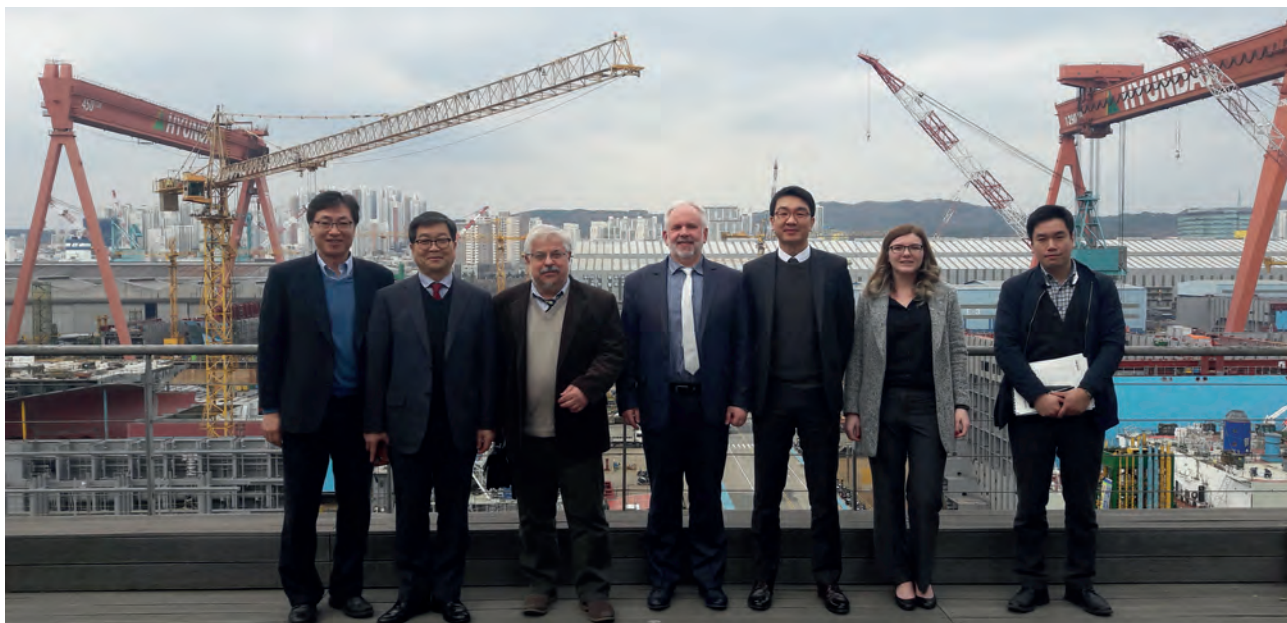
Напрямок механізації і автоматизації зварювання корпусів легкоброньованої техніки для Укроборонпрому та закордонних фірм також є одним з пріоритетних для ДКТБ. За участі ДКТБ спроектова-

но, оснащено зварювальним і механічним зварювальним обладнанням та введено в експлуатацію цех по виробництву легкоброньованої техніки на території закордонного замовника. Створено роботизовані установки для автоматичного зварювання корпусів з використанням розробок з дозованої подачі електродного дроту.

Важливим напрямком є створення технології та розробка обладнання по створенню елементної бази для виготовлення різних типів високоефективних теплообмінних апаратів повітряного охолодження та конденсаційних утилізаторів теплової енергії — композиційних теплообмінних поверхонь та технології їх виготовлення. Роботи по завданню Міністерства освіти і науки проводяться спільно з теплоенергетичним факультетом НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Розроблена технологія приварювання елементів з алюмінієвих сплавів на сталеву плоскоовальну трубу і нове обладнання для виробництва оребрених труб як поперечного, так і поздовжнього оребрення.

Продовжуються роботи з компанією POLCASTING по проекту модернізації пресового обладнання на заводі Celsa (Польща).

Постійно виконуються роботи на замовлення Державного аварійно-технічного центру НАЕК Енергоатом зі створення і ремонту спеціалізованого обладнання.







## ІНЖЕНЕРНИЙ ЦЕНТР ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

Відділ «Стикове зварювання» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та ДП «Інженерний центр зварювання тиском НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» протягом багатьох десятиліть спеціалізуються на розробці технологій та устаткування для контактного стикового зварювання оплавленням (КСЗО) залізничних рейок різних марок, а також труб різного діаметра та сортаменту.

ДП «Інженерний центр зварювання тиском» було створено у 1987 р., для промислового впровадження та широкого освоєння розробок інституту.

**Основною діяльністю центру є виготовлення головних зразків машин, ремонт та модернізація обладнання для КСЗО залізничних рейок в польових умовах, а також навчання персоналу для роботи в цих областях.**

Розроблені в ІЕЗ технології та обладнання, яке виготовлено в інженерному центрі, швидко отримали широке застосування на залізничних шляхах України та світу. В умовах високої світової конкуренції, даною технологією та обладнанням зацікави-

лись провідні світові залізничні компанії з Австрії, Франції, Японії, США, Китаю та інших країн.

В останнє десятиріччя в багатьох країнах спостерігається інтенсивна реконструкція залізниць і рейкового шляху. При цьому використовуються високоміцні рейки, що мають твердість до *HV 400*. За технологічними умовами потрібно отримати міцність зварних з'єднань практично нарівні з основним металом рейкової сталі і високими пластичними властивостями. Такі показники при застосуванні традиційних технологій не вдавалося отримати. В ІЕЗ проводяться систематичні дослідження зварюваності нових високоміцних рейок різних світових виробників (Австрії, КНР, США, України, Японії) з метою розробки технологій зварювання, що забезпечують необхідні механічні властивості. При цьому виникає необхідність істотної зміни систем управління зварювальних машин, конструкцій їх окремих вузлів. Зокрема, було встановлено, що для якісного зварювання високоміцних рейок необхідно суттєво змінити технологію контактного нагріву та конструкцію механічної частини машин, що забезпечують підвищення зусиль затискання в 1,5 ... 2,0 рази.







Машина К 900



Машина К960



Машина К1045

Відомо, що в процесі експлуатації безстикової колії в закріплених рейках виникають напруження, пов'язані зі зміною температури, тобто під впливом навколишнього середовища. Їх вплив призводить до деформації колії, порушення заданих розмірів колії, а в критичних ситуаціях – аварій.

В результаті проведених розробок було створено і запатентовано в провідних зарубіжних країнах нове покоління зварювальних машин і технологія, що отримала назву «пульсуюче оплавлення». Перші машини такого типу К900, К920 були розроблені в ІЕЗ і пройшли випробування

на залізницях США спільно з фірмою «Norfolk Southern Corporation» та іншими американськими замовниками.

За останні п'ять років в ІЕЗ було розроблено нове покоління машин типу К1045 та К960 для КСЗО з натягом рейкових плітей довжиною до 1000 м.

На сьогодні є успішний досвід зварювання рейкових плітей з використанням розробленого обладнання та технології для метро в США, КНР, Сінгапурі та інших країн світу, причому з'єднання здійснюється безпосередньо в тунелях.





## НІЦ «МАТЕРІАЛООБРОБКА ВИБУХОМ» ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

На початку 1970-х років рішенням Ради Міністрів УРСР був затверджений проект про створення Дослідного виробництва з металообробки вибухом в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, яке у 1997 р. постановою бюро президії НАН України було реорганізовано в Науково-інженерний центр «Матеріалообробка вибухом» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона (НІЦ МВ). Необхідність досліджень в цьому напрямку було обумовлено бурхливим розвитком нових галузей промисловості: хімічної, атомної, космічної та ін., які вимагають створення нових композиційних матеріалів (біметалів) для отримання яких застосовувалось зварювання вибухом.

НІЦ МВ сьогодні має у своєму розпорядженні полігон для проведення підривних робіт на відкритих майданчиках, бронелях і у вибухових камерах, одна з яких унікальна та не має аналогів в світі. Вона має конструкцію корпусу у вигляді півсфери, утвореної з відрізків труб і розрахована на підрив заряду вибухової речовини до 200 кг в броньованому тирі. Спорядження зарядів вибуховою речовиною здійснюється в спеціальному цеху, що має 40 ізольованих бронекабін, які дають можливість проводити паралельно до 10 нових технологічних процесів. У складі НІЦ МВ є склад загальної ємністю до 15 т вибухових матеріалів.

Дослідно-випробувальний полігон НІЦ МВ для матеріалообробки вибухом, утилізації боєприпасів та ракет — унікальний комплекс будівель і споруд, забезпечений інженерними мережами і комунікаціями, а також дослідно-виробничим та лабораторним обладнанням і приладами, який дозволяє проводити всі види досліджень та розробок в галузі використання або локалізації енергії вибуху для господарських і спеціальних цілей, а також виробництва дослідних та промислових партій зарядів для різання і зварювання вибухом.

До початку 1980-х років основними напрямками досліджень і розробок НІЦ МВ були: зварювання вибухом, різання металів вибухом, обробка вибухом зварних з'єднань металоконструкцій, син-

тез алмазів вибухом. Були проведені дослідження процесу акумуляції, ефективності дії подовжених зарядів по різним перешкодам і оптимізації їх параметрів, особливостей і параметрів волочіння зарядів, а також роботи зі створення технологічних процесів різання за допомогою зарядів та обладнання для їх виготовлення.

У 1980-ті роки НІЦ МВ виконав великий обсяг досліджень по створенню вибухових технологій і виробів для проведення технологічних та аварійно-відновлювальних робіт на магістральних трубопроводах, а також авіаційної та космічної техніки.



Трубочата камера потужністю 200 кг тротилу



Макет камери



Стандартні кумулятивні заряди (лінійний та кільцевий) та перфратор для нафтогазової промисловості



Шахтна пускова установка підготовлена до демонтажу

Серед них найбільш важливими є:

ТрККЗ – труборіз кільцевий кумулятивний зовнішній для поперечного різання труб при аварійно-відновлювальних роботах і демонтажі магістральних трубопроводів;

ТрККС – труборіз кільцевий кумулятивний сидлоподібний для проведення технологічних робіт при підключенні відведень працюючих нафто- і водопроводів без зупинки перекачування продукту;

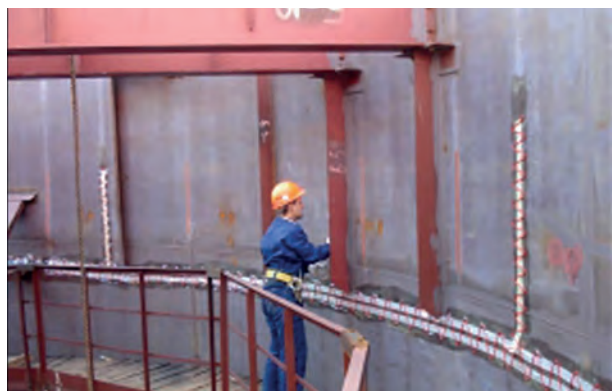
– підготовка труборіза для підводного різання: технологія зварювання вибухом триметалевої труби (ИХ18Н9Т + АМГ6 + ИХ18Н9Т) паливної системи і перехідника (ИХ18Н9Т + АМГ6) між ракетним двигуном і оболонкою міжконтинентальної балістичної ракети;

– ЛУР — лінійне облаштування розділення комплексної системи аварійної евакуації для утворення аварійних виходів в корпусі космічного корабля багаторазового використання; система аварійного відділення від вертольота радіолокаційної антени («Полотно»); облаштування для аварійного відділення лопатей вертольота («УОЛ») для катапультивання членів екіпажу: система руйнування скління літаків для забезпечення можливості покидання літальних апаратів членами екіпажу в аварійному стані;

– пристрій для екстреного відділення радіомаяка («чорного ящика») від літального апарату у разі події.

За останні роки у НІЦ МВ проведені і впроваджені наступні роботи:

– технологія утилізації шахтних пускових установок (ШПУ), проведена ліквідація 49 ШПУ та обробка вибухом 17 баків Миколаївського глиноземного заводу;



Робочий момент обробки вибухом декомпозера



Шахтна пускова установка після утилізації вибухом

– технологія виготовлення перфораторних зарядів для нафтогазових свердловин, а також технологія подрібнення конверсійних шашок вибухових речовин типу А-ІХ-1 і Окфол;

– технологія виготовлення комплексу запахових реквізитів для тренування службових собак кінологічних підрозділів з пошуку вибухових речовин, де в якості одоранту використовувалися вибухові речовини, зокрема: тен, гексоген, тротил, октоген, окфол, ТГ-50.

– комплекси модульного динамічного захисту бронетанкової техніки «НІЖ» і «Дуплет»; модулі «НІЖ» відрізняються високою надійністю (100 % спрацьовування), надійним захистом танків або інших бойових машин від бронебійно-підкаліберних снарядів, кумулятивних засобів ураження та ударно-кумулятивних боєприпасів типу «ударне ядро», підвищена безпека захисту в разі обстрілу з стрілецької зброї, відсутність детонації від осколків і запалювальних сумішей типу «Напалм».

У 2003 р. після всебічних випробувань з використанням сучасних вітчизняних і зарубіжних протитанкових засобів (ПТЗ) комплекс був прийнятий на озброєння українською армією.

Для захисту від танкових ПТЗ при будь-яких умовах зустрічі боєприпасу з бронемашиною розроблено комплекс «Дуплет», який також прийнятий на озброєння і встановлений на танк «Оплот». На сьогодні в оснащувальному цеху НІЦ МВ можливе виготовлення перфораторних зарядів у кількості 100 тис. шт. на рік, а також подовжених ( $L = 3200$  мм) термоводостійких зарядів в свинцевій та алюмінієвій оболонці для ініціювання перфораторних зарядів в кількості 1000 шт. на рік, серійних партій елементів динамічного захисту ХСЧКВ-34 та ХСЧКВ-19.

НІЦ МВ є підприємством, що здійснює повний цикл розробки і впровадження нової продукції по ланцюжку: дослідження — дослідно-конструкторські та технологічні роботи — організація виробництва — виробництво.

НІЦ «Матеріалообробка вибухом» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України по праву відносять до наукових об'єктів, що становлять національне надбання України.





## КИТАЙСЬКО-УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА

Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона (КУІЗ), створений у 2011 р., — це платформа міжнародного науково-технічного співробітництва у КНР для впровадження у Китаї та Україні досягнень і досвіду ІЕЗ ім. Є.О. Патона, інших інститутів НАН України та підприємств, а також для проведення з китайськими партнерами спільних розробок і організації наукоємних виробництв в галузі суднобудування, морської інженерії, авіації, залізничного транспорту, видобутку і транспортування нафти і газу, енергетики, енергозбереження. Така форма співпраці не має аналогів по масштабу вже реалізованих проектів.

В даний час Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона є юридичною особою, відповідно до законодавства КНР, що входить до складу Академії наук провінції Гуандун. Вся діяльність з міжнародного співробітництва в рамках КУІЗ фінансується китайською стороною. Джерела отримання фінансування з китайської сторони — прикладні проекти центрального уряду КНР, уряду провінції Гуандун, міста Гуанчжоу або державних промислових корпорацій, а також акціонерних і приватних компаній з КНР. Фінансова підтримка проектів здійснюється на конкурсній основі, тобто для отримання фінансових коштів в Китаї за кожним проектом в конкурсі беруть участь державні інститути і підприємства КНР, а також провідні закордонні компанії в галузі зварювання та споріднених процесів.

В рамках КУІЗ у виконанні міжнародних проєктів беруть участь ряд інститутів НАН України,

провідних технічних університетів України, а також великих промислових підприємств і науково-виробничих інноваційних компаній. Зокрема, крім ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, в такій співпраці беруть участь наступні академічні інститути: ІПМ ім. І.М. Францевича, ФТІМС. В міжнародних проєктах в рамках КУІЗ найбільш активну участь приймають наступні університети: НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», НУК імені адмірала Макарова. Також для виконання виробничих завдань, зокрема для виробництва відповідальних вузлів високотехнологічного обладнання, для роботи КУІЗ залучаються ряд промислових та науково-виробничих підприємств з різних регіонів України, зокрема, з Києва, Дніпра, Харкова, Житомира, Миколаєва, Сум та інших міст.

Протягом своєї діяльності КУІЗ спільно з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ) реалізував кілька десятків великих проєктів з доопрацювання та впровадження в промисловість передових розробок ІЕЗ. Серед них можна відзначити:

- ♦ розробка універсального обладнання та технології контактної стикового зварювання оплавленням конструкційних сталей, алюмінієвих і титанових сплавів та їх промислове застосування;
- ♦ створення обладнання нового покоління для контактної стикового зварювання оплавленням труб (114...320 мм);
- ♦ розробка технології та обладнання для орбітального зварювання трубопроводів енерге-



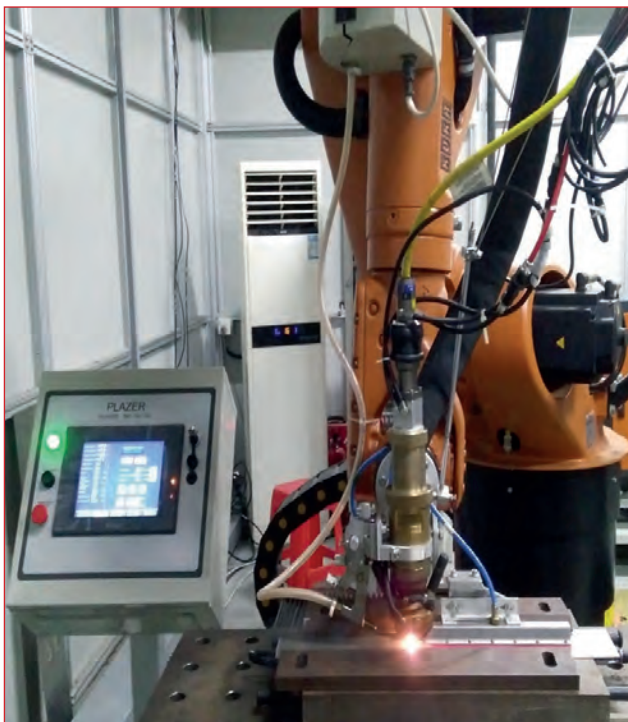
Підписання офіційних документів про створення та організацію діяльності Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона (2012–2013 рр.). Зліва — направо: губернатор провінції Гуандун пан Чжу Сяодань, президент Національної академії наук України, почесний голова Ради КУІЗ академік Б.Є. Патон, заступник міністра науки і техніки КНР, почесний голова Ради КУІЗ пан Цао Цзяньлінь, заступник директора ІЕЗ, голова Ради КУІЗ академік І.В. Кривцун



Устаткування для зварювання у вузький зазор в керованому магнітному полі довгомірних конструкцій з титанових сплавів товщиною 20...120 мм і довжиною до 4 м та зварний виріб з титанового сплаву Ti4-Al-2V товщиною 120 мм

тичного устаткування по шару активного флюсу (А-ТІГ);

♦ створення технології та універсального обладнання для швидкісного плазмового, а також гібридного та комбінованого (тандем) плазмово-дугового (Плазма-MIG) зварювання, його інтеграція в роботизований комплекс;

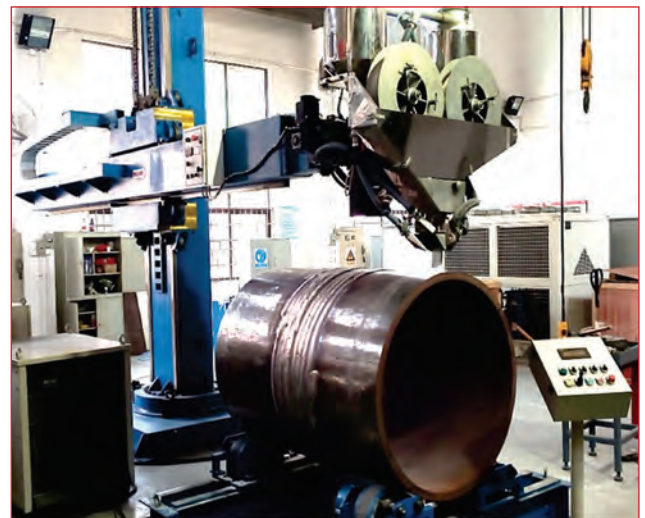


Роботизований технологічний комплекс для швидкісного гібридного лазерно-плазмового зварювання

♦ створення технології і нового покоління обладнання для мікроплазмового та гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання імпульсним струмом на різнополярних режимах;

♦ створення технології та обладнання для автоматизованого дугового зварювання довгомірних конструкцій (до 4 м) з високоміцних титанових сплавів великої товщини (до 120 мм) в вузький зазор в керованому магнітному полі;

♦ створення апаратури і технології електродинамічної обробки зварних швів з алюмінієвих сплавів для суднобудування з метою ефективного зниження і регулювання зварювальних деформацій;



Електрошлакове наплавлення двома стрічками великогабаритних конструкцій енергетичного обладнання





Установка електронно-променевого зварювання для застосування в гранульній металургії

- ♦ розробка технології та обладнання для отримання порошків сферичної форми з високоміцних складнолегованих титанових сплавів із застосуванням плазмових процесів;
- ♦ застосування передових електронно-променевих технологій в турбобудуванні при отриманні

манні заготовок лопаток газових турбін методом гарячого ізостатичного пресування порошків (наповнення, дегазація, ущільнення, герметизація (зварювання) контейнерів з металевим порошком для подальшого гарячого ізостатичного пресування);

- ♦ розробка технології дифузійного зварювання жароміцних сплавів на основі  $Ni_3Al$  з керованим напружено-деформованим станом;

- ♦ вдосконалення обладнання для високочастотного зварювання живих тканин, його адаптація до умов роботи в китайських медичних установах;

- ♦ розробка нових технологій плазмового зварювання «титан-сталь» та їх апробація у виробництві біметалічних труб для транспортування нафти і газу;

- ♦ створення спеціалізованого обладнання і технології високопродуктивного (до 45 кг/год) електрошлакового наплавлення двома стрічками великогабаритних виробів енергетичного обладнання;

- ♦ створення технології та обладнання для високопродуктивного плазмового різання металів підвищених товщин (до 120...150 мм) на зворотній полярності, його інтеграція з системами числового програмного керування стосовно до виробництва великогабаритних конструкцій;

- ♦ розробка обладнання нового покоління для надзвукового плазмового напилення теплозахисних, жаростійких, зносостійких, корозійностійких і спеціальних покриттів.

Китайсько-український Інститут зварювання має високий авторитет в КНР, Урядом КНР високо оцінені результати діяльності КУІЗ і внесок ІЕЗ в цю діяльність. Зокрема, українські співробітники Інституту електрозварювання, які брали участь в реалізації спільних проектів, відзначені понад десяти урядових нагород КНР, в тому числі вищих нагород центрального уряду КНР.



Нагородження заступника директора ІЕЗ І.В. Кривцуна, 2019 р. (ліворуч) і керівника відділу ІЕЗ, директора КУІЗ з української сторони В.М. Коржика (2014 р.) вищими нагородами Уряду КНР – медалями «За видатні досягнення в міжнародному науково-технічному та економічному співробітництві»





## МІЖГАЛУЗЕВИЙ УЧБОВО-АТЕСТАЦІЙНИЙ ЦЕНТР ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

Державне підприємство «Міжгалузовий учбово-атестаційний центр Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» створено у 1988 р. рішенням уряду України на базі діючих з 1958 р. при ІЕЗ ім. Є.О. Патона курсів із підвищення кваліфікації інженерно-технічних працівників.

Професійне навчання, підвищення кваліфікації та атестація (сертифікація) персоналу зварювального виробництва з орієнтацією на розвиток і поглиблення професійної компетентності є визначальною концепцією в діяльності ДП «МУАЦ ІЕЗ ім. Є.О. Патона».

Центр акредитований в національній та міжнародній кваліфікаційній системі та забезпечує безперервну, багатопланову професійну підготовку різних категорій персоналу зі зварювання за програмами:

- Перепідготовка та підвищення кваліфікації інженерно-технічного персоналу в галузі зварювання та споріднених технологій
- Підвищення кваліфікації викладачів та майстрів виробничого навчання (інструкторів) зі зварювання
- Професійна підготовка, перепідготовка та підвищення кваліфікації зварників і контролерів з неруйнівного контролю
- Кваліфікаційна атестація персоналу зварювального виробництва відповідно до національних та міжнародних вимог

Навчальні програми перепідготовки та підвищення кваліфікації інженерно-технічного персоналу розраховані на фахівців, які вирішують проблеми впровадження нових технологічних процесів зварювання та споріднених технологій та направлені на розвиток професійних знань та

умінь, пов'язаних з реалізацією функцій управління, координації та забезпечення якості зварювання відповідно до вимог національних, європейських і міжнародних стандартів.



Сертифікати та свідоцтво про акредитацію

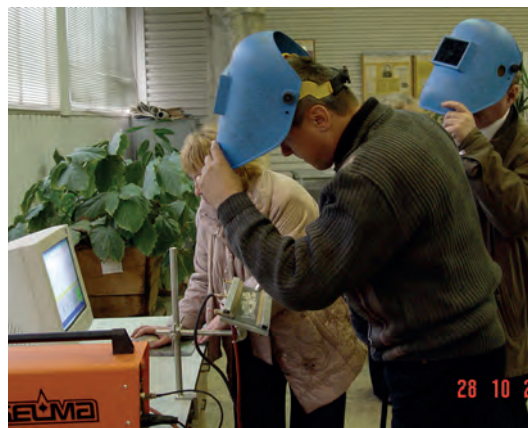


Програми підвищення кваліфікації викладачів та майстрів виробничого навчання зі зварювання передбачають розширення їх професійної компетентності для впровадження інноваційних технологій навчання та формування нових підходів в організації професійної підготовки зварників.

Сучасне зварювальне виробництво пред'являє спеціальні вимоги до професійної підготовки



Заняття в групі інженерів зі зварювання



Заняття в комп'ютерно-тренажерному класі

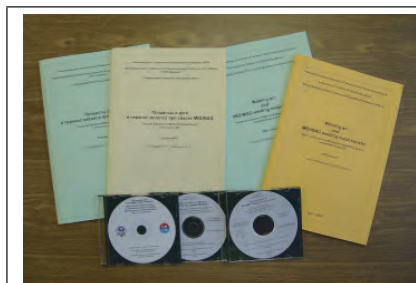




Практичне заняття у навчальній майстерні



Підтвердження професійної кваліфікації



Навчальні посібники модульної технології навчання



Навчальні майстерні

зварників, професійна компетентність яких повинна відповідати діючим на виробництві вимогам з забезпечення якості зварювання. Програми професійної підготовки зварників розроблено на базі модульних навчальних систем, рекомендованих Міжнародною організацією праці та Міністерством освіти і науки України. Застосування модульних навчальних програм забезпечує мобільність професійної підготовки, значно полегшує сприйняття навчального матеріалу та дає можливість кожному слухачеві засвоювати програму у власному зручному темпі.

Підтвердження професійної компетентності (атестація) проводиться за програмами спеціальної підготовки та кваліфікаційних випробувань згідно з діючими в зварювальному виробництві нормативними документами (правила та стандарти).

Центр також має акредитацію Міжнародного інституту зварювання і Європейської федерації зварювання на підготовку та присвоєння міжнародних професійних кваліфікацій у галузі зварювання:

- Міжнародний інженер зі зварювання (IWE);
- Міжнародний технолог зі зварювання (IWT);
- Міжнародний спеціаліст зі зварювання (IWS);
- Міжнародний практик зі зварювання (IWP);
- Міжнародний інспектор зі зварювання (IWIP);
- Міжнародний зварник (IW).

Центр є учасником міжнародних програм з підготовки персоналу зварювального виробництва й використовує в навчальному процесі інноваційні



Диплом міжнародного інженера зі зварювання

навчально-методичні матеріали як власної розробки, так і створені в інших країнах.

Навчальна база, яка оснащена сучасним зварювальним устаткуванням, інноваційні технології навчання та висококваліфіковані викладачі та інструктори забезпечують досягнення кожним слухачем необхідного рівня професійної кваліфікації.

<http://muac.kpi.ua>



## МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ «ПАТОНСЕРТ»

Товариство з обмеженою відповідальністю «Міжнародний науково-технічний центр забезпечення якості та сертифікації «ПАТОНСЕРТ» (ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ») створено в 1994 р. спільним рішенням НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України», Товариства зварників України, Асоціації зварників Грузії і Казахстану та Інституту зварювання та захисних покриттів (Білорусь) з метою підвищення якості та конкурентоспроможності продукції зварювальних виробництв на основі впровадження і сертифікації систем забезпечення якості.

Основні напрямки діяльності центру:

- розроблення правил і процедур проведення оцінки та сертифікації зварювальних виробництв;
- надання консультаційних послуг підприємствам зварювального виробництва при впровадженні систем забезпечення якості зварювання;
- проведення спільних з міжнародними центрами сертифікаційних випробувань;

– сертифікація зварювальних виробництв відповідно до вимог національних та міжнародних стандартів;

– надання послуг з розробки технологічних інструкцій зі зварювання (WPS);

– атестація технологій зварювання.

ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» акредитовано з 2006 р. Міжнародним інститутом зварювання та Європейською зварювальною федерацією (міжнародна система сертифікації ІІВ/ЕВФ) на проведення оцінки та сертифікацію зварювальних виробництв, атестацію технологій зварювання на відповідність європейських та міжнародних стандартів серії EN ISO 3834.

Сертифікація зварювального виробництва згідно EN ISO 3834 застосовується, коли потрібно підтвердження здатності виробника виготовляти зварні конструкції, якість яких цілком задовольняє регламентованим вимогам.

Визначальним фактором підтвердження відповідності регламентованим вимогам є атестаційні випробування технологій зварювання відповідно з вимогами стандарту EN ISO 15614 та оформлення Протоколу підтвердження технології зварювання (WPQR).

Партнерами ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» є більш як 30 підприємств України та європейських країн. Зокрема, сертифікати ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ» отримали такі підприємства, як: БАТ «ТУРБОАТОМ», ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», ПАТ «Запоріжжкран», ПрАТ «Краматорський завод важкого станкобудування», ТОВ «ОРІОН.ГРУП», ТОВ «MADESTA» (Латвія).

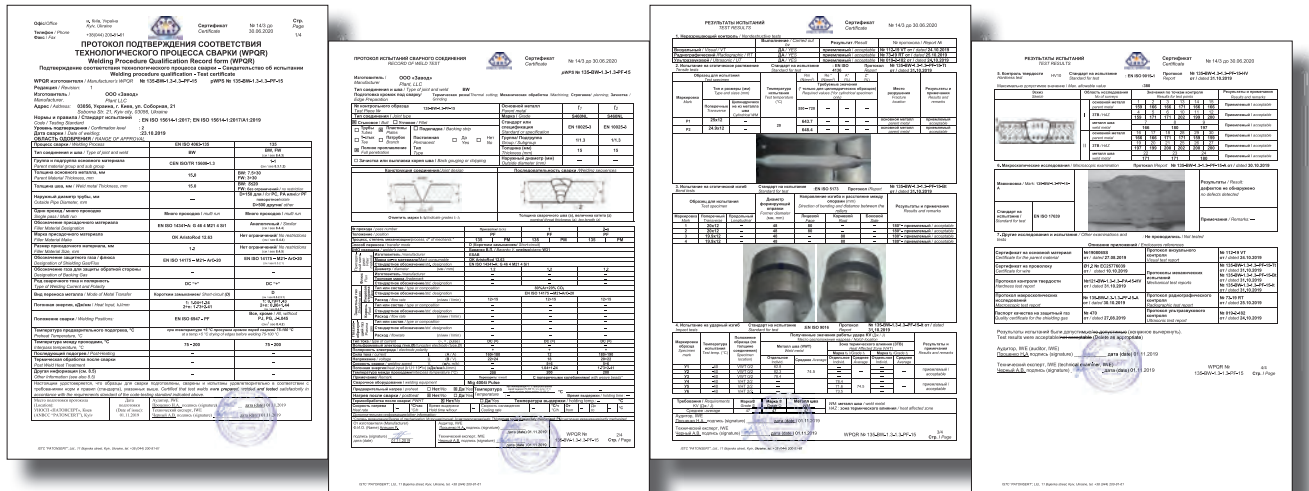


Сертифікати акредитації



Міжнародний та Європейський сертифікати підприємств





Вручення сертифікатів в ІЕЗ ім. Є.О. Патона



ПАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування» та АТ «ТУРБОАТОМ»



ТОВ «СТАЛЬМОСТ»



ПАТ «Запорізький завод важкого кранобудування»



ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод»

E-mail: patoncert@gmail.com





## АТЕСТАЦІЙНИЙ ЦЕНТР З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ при ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

Державне підприємство «Атестаційний центр з неруйнівного контролю при ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» (АЦНК) створено у 1991 р. на базі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України постановою Президії НАН України з метою організації навчання і атестації для подальшої сертифікації фахівців I, II та III рівнів з неруйнівного контролю зварних конструкцій і виробів, згідно з національними, європейськими та міжнародними стандартами та нормами. Центр акредитовано в національній та міжнародній кваліфікаційній системі по навчанню, атестації та сертифікації фахівців по наступним методам неруйнівного контролю ():

- візуально-оптичний (VT)
- ультразвуковий (UT)
- радіографічний (RT)
- капілярний (PT)
- магніто-порошковий (MT)
- вихрострумний (ET)
- акустичний (AT)
- контроль герметичності (LT)
- тепловий (TT).

За час свого існування в атестаційному центрі пройшли підготовку близько 10 тис. фахівців (у тому числі й іноземні спеціалісти), надано тисячі послуг з технічного діагностування та неруйнівного контролю об'єктів підвищеної небезпеки.



Практичні заняття



Теоретичні заняття



Навчання по UT





Група слухачів з НК



Республіканський стадіон, де було проведено роботи по неруйнівному контролю

Іншим напрямком діяльності АЦНК є обстеження методами неруйнівного контролю технічного стану об'єктів підвищеної небезпеки з метою запобігання потенційно аварійним ситуаціям. Центр проводить неруйнівний контроль, технічне діагностування та технічне опосвідчення наступного обладнання:

- метало- та будівельні конструкції
- парові та водогрійні котли
- посудини, що працюють під тиском
- трубопроводи пари та гарячої води
- вантажопідйомні механізми
- технологічні трубопроводи та обладнання
- магістральні трубопроводи
- резервуари для зберігання нафтопродуктів.

АЦНК займається розробкою технологій для контролю обладнання у відповідності до нових національних стандартів гармонізованих з європейськими та міжнародними, а також розробляє обладнання для неруйнівного контролю.

За багато років своєї діяльності ДП «АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О. Патона» зарекомендувало себе, як надійний та висококваліфікований партнер, клієнтами якого стали найбільші підприємства України.



Проведення діагностики зварних з'єднань на Подільському цементному заводі

У своїй діяльності центр дотримується наступних принципів:

- якісне та своєчасне виконання своїх обов'язків перед Замовником
- збереження єдиних принципів роботи з Замовником незалежно від його статусу
- збереження конфіденційності інформації
- оперативне реагування на побажання Замовника
- чесність та порядність у виконанні своїх обов'язків.

#### Наші можливості:

- колектив досвідчених та висококваліфікованих викладачів
- сучасна матеріально-технічна та методична база
- багаторічний досвід на ринку послуг
- використання сучасних комп'ютерних технологій для самопідготовки та об'єктивного оцінювання набутих знань
- гнучкий підхід до побажань Замовника
- можливість проведення виїзних сесій
- індивідуальний підхід до кожного.

Тел.: +38 (044) 200-81-83, 200-81-40, 200-81-86  
acnk.kiev.ua

# Краса зварювання



Композиція «Метелик», 2020 р.,  
титан, висота 50 см,  
TIG зварювання  
та наплавлення

Автор:  
художник-зварник  
Дмитро Кушнірук

Фото: Володимир Дибань







ACTING GLOBAL  
WELDING LOCAL



Welding  
Alloys  
Group



**Дугове наплавлення.  
Матеріали. Технології. Обладнання.**

Отримання виробів з особливими, часом унікальними, властивостями робочих поверхонь  
вельми актуально при виготовленні та відновленні відповідальних конструкцій.  
Найширший спектр матеріалів та устаткування одного зі світових лідерів в області відновлювального  
наплавлення – концерну «Welding Alloys» представлено на ринку України компанією «ТМ.ВЕЛТЕК» –  
найбільшим національним виробником порошкових дротів.

marketing@welding-alloys.com  
www.welding-alloys.com



Представництво в Україні  
ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК»  
www.weldtech-group.com

Easy to weld  
High productivity