

СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКИ ІЕЗ ім. Є. О. ПАТОНА В ГАЛУЗІ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Б. Є. ПАТОН

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

Представлено ряд нових розробок Інституту електрозварювання, створених останнім часом, а саме, технології та обладнання для зварювання із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії — плазми, лазера, електронного променя. Створено технології для зварювання труб, титану великих товщин, алюмінієво-літєвих сплавів, високоміцних сталей. Розроблено парофазні технології отримання наноструктурованих матеріалів для зварювання композитних матеріалів та інтерметалідів. Створено технології та обладнання для зварювання та різання під водою, новий електронно-променевий інструмент для зварювальних робіт у відкритому космосі. Для підвищення довговічності та надійності зварного шва запропонована післязварювальна обробка — імпульсами електричного струму високої щільності та високочастотне механічне проковування. Для контролю якості зварних конструкцій створено цифрове обладнання на основі високочутливих твердотільних перетворювачів, а для виробів складної геометрії — промисловий робот з системою технічного зору. Розроблено новий спосіб вирощування монокристалів тугоплавких металів. Представлено нову апаратуру для зварювання живих тканин. Бібліогр. 28, табл. 2, рис. 25.

Ключові слова: зварювання плазмове, лазерне, електронно-променеве, контактне, титан, алюмінієво-літєві сплави, міцність, контроль якості, наплавлення, монокристали, зварювання живих тканин

Зварювання і споріднені технології нині постійно і стабільно розвиваються. З їх застосуванням промислово розвинені країни світу виробляють більше половини свого валового національного продукту. Впевнено рухаючись вперед, зварювання увійшло в усі сфери життя людини. Воно широко використовується не тільки в промисловості та будівництві, а також й у виробництві побутової техніки, спортивного інвентаря, створенні виробів образотворчого мистецтва та навіть медицині. Все це дозволяє світовому зварювальному товариству констатувати, що сучасні технології зварювання не тільки застосовуються у матеріальному виробництві продукції, але й впливають на підвищення якості життя людини та сприяють досягненню сталого розвитку сучасного суспільства.

Аналіз тенденцій розвитку глобального ринку зварювальної техніки свідчить, що і надалі технології зварювання будуть найбільш поширені. Значно зростатимуть потреби в енергозберігаючих технологіях зварювання, що базуються на використанні висококонцентрованої енергії — плазмової, лазерної, електронно-променевої, а також гібридних джерел енергії. Автоматизація та роботизація процесів зварювання поширюватиметься і стане у нагоді там, де вона найбільш ефективна. Застосування нових конструктивних форм дозволить удосконалити зварні конструкції, а зниження їх металоємності забезпечить використання сталей і сплавів більш високої міцності. Проте не треба забувати про вимоги надійності, довговічності та якості зварних конструкцій.

Перспективними є дослідження та розробки Інституту електрозварювання, які виконано в останні роки з урахуванням тенденцій розвитку сучасних напрямків зварювальної науки і техніки.

Плазма як висококонцентроване джерело енергії знаходить все більше застосування у зварюванні та споріднених технологіях. В Інституті електрозварювання (ІЕЗ) здійснено ряд розробок, які дали гарні результати. Підвищити технологічні і техніко-економічні показники процесу зварювання товстого металу дозволила розроблена технологія швидкісного плазмового зварювання сплавів товщиною до 12 мм за один прохід і зварювальне обладнання — зварювальні плазмотрони оригінальної конструкції, плазмовий модуль, система керування за допомогою програмованого логічного контролера з можливістю інтеграції зі зварювальним роботом. Обладнання забезпечує можливість роботи з різнополярними імпульсами струму з заданою формою хвилі, з плавним регулюванням і дискретним регулюванням тривалості імпульсів та пауз між ними в широкому діапазоні, а також можливість роботи на постійному та імпульсному струмі прямої та зворотної полярності. У порівнянні з традиційним процесом дугового ТП зварювання шов, отриманий плазмовим зварюванням, має на 40 % меншу ширину та масу металу, що наплавляється, а також більш дрібнодисперсну та однорідну структуру зони сплавлення. При цьому величина погонної енергії зменшується в 2,5...3,0 рази, а зона знеміцнення — в 1,5.

Значним досягненням останніх років є створення гібридного плазмово-дугового зварювання [1, 2]. Об'єднання двох зварювальних джерел

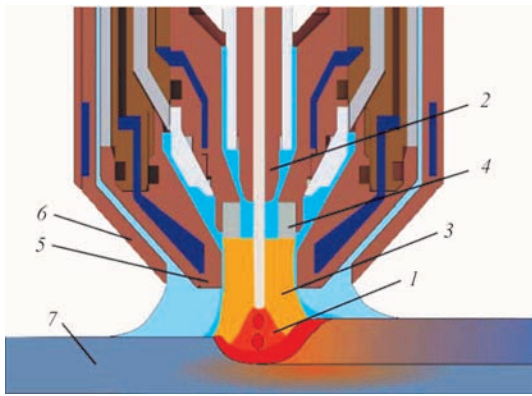


Рис. 1. Схема гібридного зварювального плазмотрона: 1 — дуга плавкого електрода; 2 — мундштук плавкого електрода; 3 — стиснута дуга прямої дії; 4 — трубчатий електрод плазмотрона; 5 — плазмостворююче сопло; 6 — захисне сопло; 7 — зварюваний зразок

живлення забезпечує більшу глибину проплавлення основного металу. Розроблена технологія зварювання сталей та алюмінієвих сплавів завтовшки 5...12 мм дозволяє у порівнянні з імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом збільшити швидкість зварювання на 25...40 %, зменшити витрати зварювального дроту на 40 %. Для реалізації цієї технології створено плазмотрон оригінальної конструкції (рис. 1) та базові технологічні процеси.

Забезпечити високі фізико-механічні властивості зварних швів алюмінієвих сплавів дозволяє створена технологія точкового плазмового зварювання зі спеціальною формою імпульсу та стабілізацією його довжини і обладнання для її реалізації. У порівнянні з точковим контактним зварюванням тиском ця технологія може використовуватись при односторонньому доступі до міс-

ця зварювання. Катодне очищення зварюваних поверхонь алюмінієвих сплавів, висока продуктивність, менші енерговитрати дозволяють інтегрувати її у роботизовані зварювальні лінії.

Із застосуванням плазмових джерел енергії в Інституті створено процес високопродуктивного надзвукового плазмового напилення покриттів з порошків металу, сплавів, керамічних матеріалів та їх сумішей. Для його реалізації створено обладнання нового покоління (рис. 2), в якому передбачена можливість роздільної подачі компонентів дешевого плазмоутворюючого газу на основі повітря з домішками метану або пропану в кількості 5...10 %. Плазмотрон, генеруючи надзвуковий струмінь, збільшує кінетичну енергію часток, що напилюються, у 9...16 разів і, як наслідок, забезпечує значне збільшення усіх службових властивостей покриттів. Зокрема, міцність зчеплення збільшується в 1,5...2,0 рази в порівнянні з покриттями, що створюються плазмовим напиленням при дозвукових режимах.

Традиційно в Інституті продовжуються дослідження і розробки з використанням лазерних та електронно-променевих джерел живлення. На основі сучасних волоконних дискових та діодних лазерів високої надійності створено технологію і автоматизоване обладнання для лазерного зварювання високоміцних та нержавіючих сталей, алюмінієвих та титанових сплавів, які використовуються для виготовлення цілої гами виробів. Наприклад, для зварювання тонкостінних труб різного діаметру з нержавіючих сталей для виробництва багат шарових сильфонів (рис. 3). Створене лазерне зварювальне обладнання вели-



Рис. 2. Обладнання для високопродуктивного надзвукового плазмового напилення

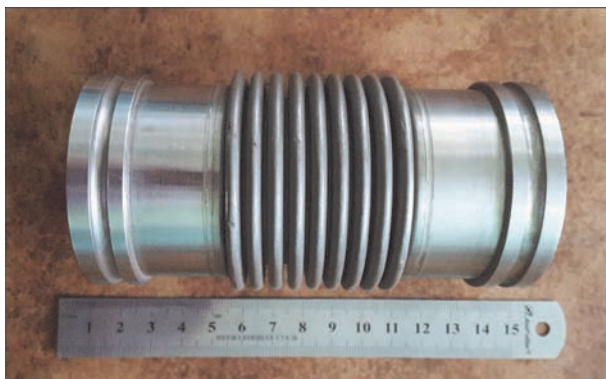


Рис. 3. Багатошаровий сиффон, виготовлений з труб, що зварені лазерним випромінюванням

кої потужності з успіхом застосовується у вагоно-, авто- та кораблебудуванні, а для монтажних робіт в цих галузях створено напівавтоматичний лазерний інструмент потужністю до 2 кВт (рис. 4).

На українських та закордонних авіа- і ракетобудівельних підприємствах пройшли промислові випробування розробки Інституту в галузі лазерного зварювання, зокрема, для зварювання різнорідних матеріалів, стрингерних панелей, сопел РРД, аерокосмічних стерен, тонкостінних корпусних конструкцій та інших елементів літальних апаратів.

У створенні обладнання для електронно-променевого зварювання ІЕЗ займає одне з провідних місць. Його продукція експортується до багатьох країн світу. В Інституті розроблено і виготовляється обладнання для електронно-променевого зварювання, яке умовно можна розділити на декілька типів за габаритами камер, а саме: малі (0,26...5,7 м³), середні (19...42 м³) та великі (80...100 м³) (рис. 5). Від конкретного завдан-



Рис. 4. Напівавтоматичний лазерний інструмент

ня замовника визначається тип камери та розробляється відповідна технологія зварювання [3]. Камери мають механічне обладнання з рухомою електронно-променевою зварювальною гарматою на прецизійному багатоосьовому механізмі переміщення. Цей механізм з числовим програмним керуванням забезпечує керований лінійний рух гармати повз трьох координатних осей, а також поворот гармати на 0...90° у площині Z-X (від вертикальної орієнтації до горизонтальної). Обертання деталі забезпечується прецизійними зварювальними маніпуляторами з горизонтальними та вертикальними осями обертання. Найбільшу технологічну гнучкість забезпечує маніпулятор з похилою віссю обертання, який здійснює

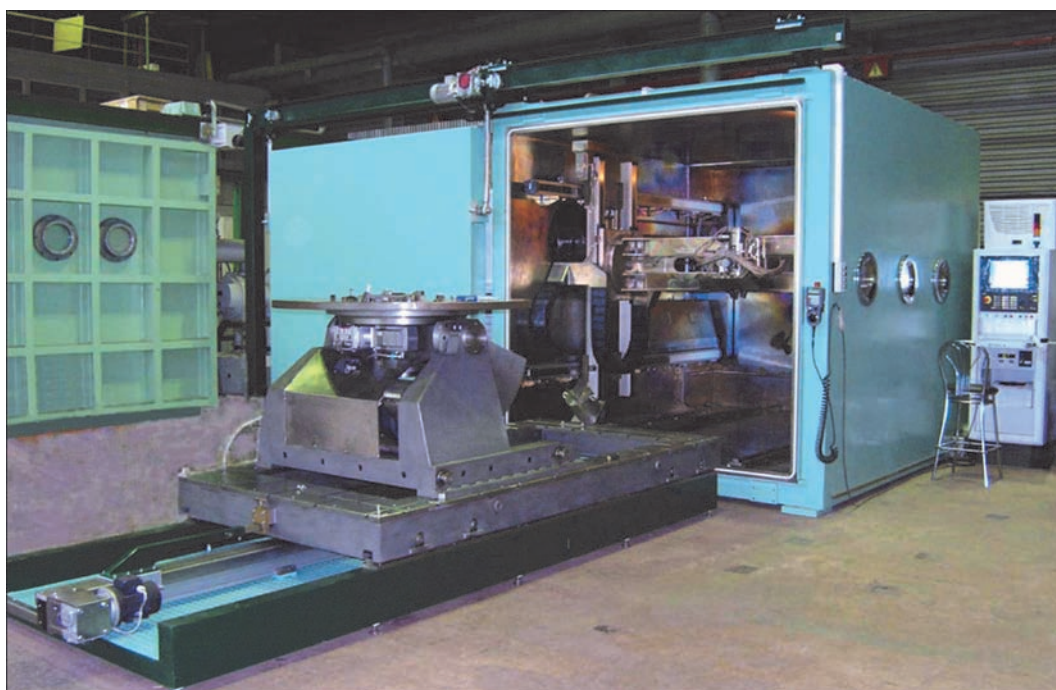


Рис. 5. Типова середньогабаритна камера з мобільною зварювальною гарматою та викатний робочий стіл



Рис. 6. Зварна заготовка секції авіаційного двигуна з титанового сплаву ВТ6

електронно-променеве зварювання, наприклад, складних концентричних секцій авіаційних двигунів (рис. 6) або авіаційних вузлів із змінною геометрією.

В залежності від конкретного призначення камера комплектується високовольтними інверторними джерелами живлення потужністю 15, 30 та 60 кВт та системою вторинно-емісійної електронної візуалізації «РАСТР», яка формує відображення зони зварювання перед, під час та після завершення зварювання. Це обладнання для електронно-променевого зварювання має сучасну систему керування із взаємодією користувача з устаткуванням виключно через Windows — орієнтований графічний інтерфейс [4].

Інститут має успішний великий досвід створення електронно-променевого обладнання та технологій космічного призначення. Проведені роботи щодо створення нового покоління електронно-променевого інструмента для зварювання при виконанні монтажних та ремонтно-відновлювальних робіт у відкритому космосі (рис. 7). Інструмент оснащений тріодною електронно-променевою гарматою потужністю до 2,5 кВт, відокремленою від високовольтного джерела живлення. Таке конструктивне рішення та використання для живлення гнучкого високовольтного кабеля з компактним високовольтним роз'ємом дозволило суттєво зменшити габарити та масу інструмента, а також збільшити його маневреність при здійсненні технологічних процесів. Збільшено також ресурс безперервної роботи та експлуатаційна надійність інструмента. Є можливість отримати гостросфокусований промінь діаметром $\leq 0,6$ мм. Маса гармати складає 3 кг. Інструмент може працювати в ручному та автоматичному режимах з використанням робототехнічного устаткування або маніпуляторів.



Рис. 7. Ручна електронно-променева гармата з високовольтним роз'ємом

Традиційно Інститут приділяє значну увагу проблемі виробництва та зварювання труб. В останні роки проведені дослідження та створені технології і обладнання для пресового зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) неповоротних з'єднань труб з товщиною стінок до 10 мм і діаметром до 200 мм з високоміцних сталей. Фізична суть процесу ПЗМД характеризується тим, що дуга під впливом зовнішнього магнітного поля, яке створюється магнітними системами, переміщується в щилині між торцями труб, що зварюються. Зварне з'єднання формується під час тиску та спільної пластичної деформації торців труб. Домінуючим фактором, який створює з'єднання, є наявність шару розплаву на початку періоду осадки.

В табл. 1 представлено механічні властивості зварних з'єднань труб різних розмірів та марок сталей. Вони відповідають вимогам міжнародних стандартів для газопроводів. Розроблені технології та устаткування знайшли широке застосування в промисловості при забезпеченні зварювання у польових та стаціонарних умовах.

Підводне зварювання — один із напрямків досліджень і розробок Інституту, де наші вчені зробили значні науково-технічні прориви, зокрема, у галузі створення зварювальних матеріалів. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження особливостей горіння дуги під водою та умов забезпечення сталого дугового процесу за різним гідростатичним тиском дозволили створити нові порошкові дроти та електроди для так званого мокрого зварювання маловуглецевих, низьколегованих сталей та сталей підвищеної міцності [5].

Для дугового різання сталей і сплавів під водою на глибині до 200 м створені електроди та порошковий дріт, а також новий тип напівавто-

Таблиця 1. Механічні властивості зварних з'єднань труб

Марка сталі	Розмір труб, мм	Основний метал σ_B , МПа	Зварне з'єднання σ_B , МПа	Основний метал KCV_{20} , Дж/см ²	Зварне з'єднання KCV_{20} , Дж/см ²	Основний метал KCV_{-20} , Дж/см ²	Зварне з'єднання KCV_{-20} , Дж/см ²	Зварне з'єднання KCV_{-40} , Дж/см ²
09Г2С	42 ($\delta=5$)	$\frac{460...478}{469}$	$\frac{453...478}{465}$	$\frac{57...59}{58}$	$\frac{59...78,1}{68,5}$	$\frac{57,8...58}{57,9}$	$\frac{64...74,5}{69,3}$	—
35	89 ($\delta=10$)	$\frac{538...565}{551}$	$\frac{528...554}{541}$	$\frac{56...64}{60}$	$\frac{52...96,5}{70}$	—	—	—
01Star520	191 ($\delta=7$)	$\frac{638...665}{651}$	$\frac{618...674}{656}$	$\frac{116...154}{135}$	$\frac{87...152}{119}$	—	—	—
STRG410	60,5 ($\delta=5,5$)	$\frac{452...464}{458}$	$\frac{450...462}{456}$	$\frac{90...98}{94}$	$\frac{86...92}{89}$	$\frac{102...104}{98}$	$\frac{87...94}{91}$	$\frac{88...94}{92}$

мату (рис. 8), подавальний механізм якого знаходиться під водою поруч з водолазом-зварником [6]. Виконані дослідження механічних властивостей металу швів (рис. 9), результати яких представлені в табл. 2, довели високу якість робіт, що виконуються запропонованою технологією підводного зварювання — металоконструкції надійно працюють десятки років. Порівняння результатів показників міцності зварних з'єднань при циклічному навантаженні показало, що вони не поступаються з'єднанням, виконаним за звичайних умов (рис. 10).

Титан — один із основних сучасних конструкційних матеріалів, що використовується у ба-



Рис. 8. Напівавтомат для підводного зварювання і різання порошковим дротом на глибині до 200 м

Таблиця 2. Механічні властивості металу швів, виконаних під водою (ANSI/AWSD3.6, клас А)

Матеріал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCV_{-20} , Дж/см ²
Електроди	≥ 460	≥ 600	≥ 29	≥ 47	≥ 100
Порошковий дріт	≥ 350	≥ 550	≥ 30	≥ 60	≥ 80
Сталь Х60	435	580	18	—	60

гатьох галузях промисловості при створенні відповідальних конструкцій. Починаючи із розробки технології зварювання листового титану малих

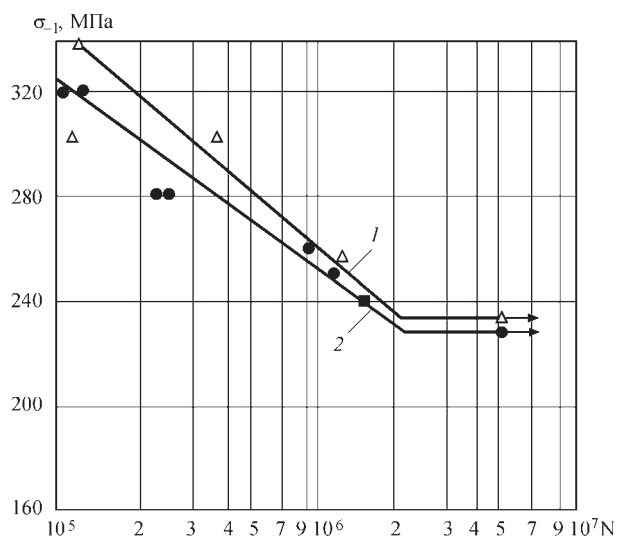


Рис. 10. Втомна довговічність при знакозмінному згинанні: 1 — зварювання під водою; 2 — зварювання на повітрі

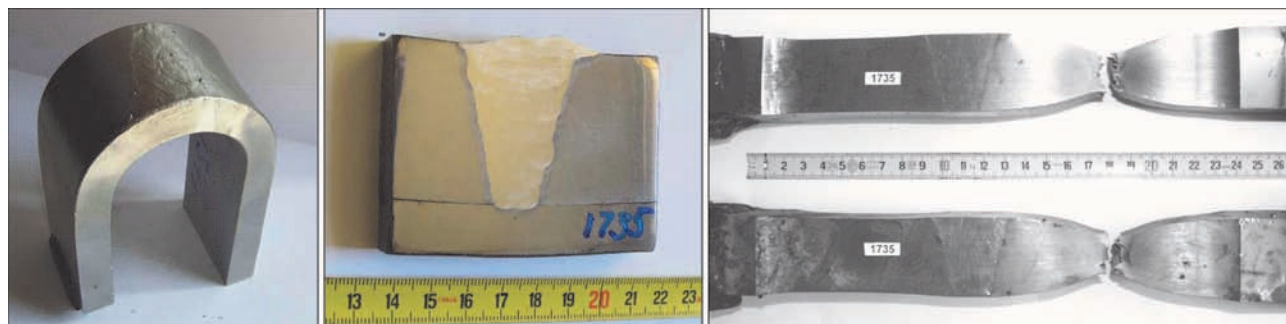


Рис. 9. Макрошліф та зразки після механічних випробувань (товщина металу 40 мм)



Рис. 11. Зварювальне обладнання УД 682 для зварювання і наплавлення деталей товщиною до 110 мм та довжиною до 4 м (а) та макрошліф зварного з'єднання (б)

товщин на початку 1950-х років Інститут постійно і всебічно займається дослідженням проблем зварювання титану. В Інституті успішно розроблено технології зварювання виробів із титану середніх і великих товщин вольфрамовим електродом у вузьке розкриття крайок. Цю технологію вирізняють такі переваги, як економічна витрата зварювального дроту, мала ширина шва та зони термічного впливу, зменшення кутових деформацій та залишкових зварювальних напружень. Для гарантованого сплавлення бокових стінок зварним швом застосовано кероване змінне магнітне поле. Створено установку УД 682 (рис. 11) для зварювання та наплавлення з'єднань товщиною до 110 мм та довжиною до 4 м. Із застосуванням цього обладнання зварено титанові сплави ПТЗВ, ВТ6, ВТ20 різної товщини. Дослідження зварних з'єднань підтвердили їх високу якість. Рівень міцності зварних

з'єднань титану ВТ6 із застосуванням зварювального присадного титанового дроту СПТ2 складає 95 % від міцності основного металу, а в'язкість KCU металу шва — 85 Дж/см². Вміст домішок газів в металі шва знаходиться на рівні їх вмісту у присадному дроті, що підтверджує високу якість газового захисту.

Титанові сплави знайшли широке застосування при виготовленні конструкцій у авіаційній та космічній галузях. В Інституті проведено комплекс досліджень щодо розроблення технології бездеформаційного зварювання стрингерних панелей з високоміцного титанового сплаву ВТ20 із забезпеченням їх високої точності і міцності при циклічних навантаженнях. Доведено, що виконання проплавних швів аргонодуговим зварюванням неплавким електродом по шару активуючого флюсу з використанням попереднього пружного де-

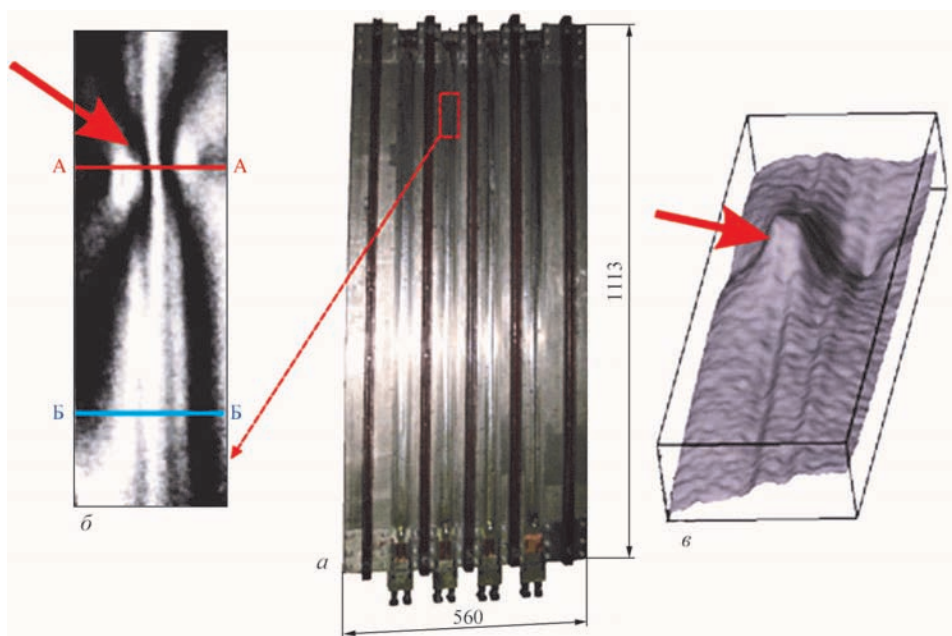


Рис. 12. Неруйнівний контроль якості стрингерної панелі зі сплаву ВТ20 методом електронної ширографії: а — панель у механічній оснастці після зварювання; б — картина інтерференційних ліній на ділянці, що досліджується; в — тривимірна картина деформованої поверхні

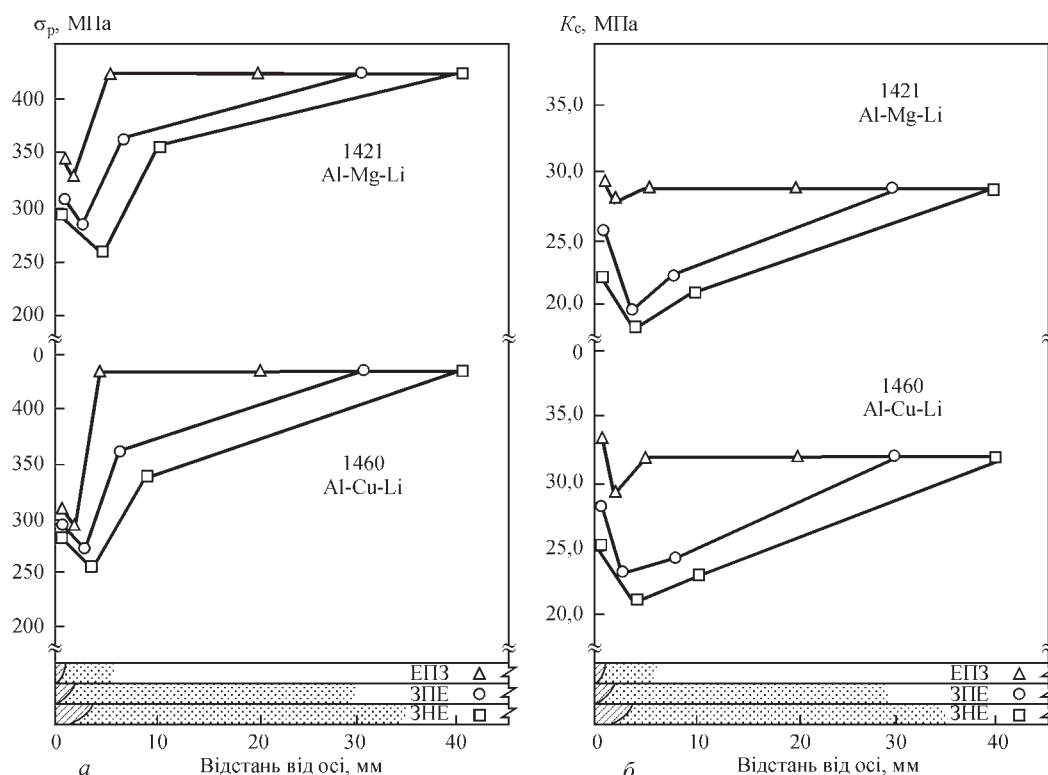


Рис. 13. Вплив способів зварювання електронним променем (ЕПЗ) плавким (ЗПЕ) та неплавким (ЗНЕ) електродами на міцність при руйнуванні σ_p (а) та тріщиностійкість K_c (б) різних зон з'єднань алюмінієво-літєвих сплавів 1421 та 1460

формування і високочастотної механічної проковки швів забезпечує вищі показники довговічності від втомленості таких панелей порівняно з електронно-променевим та аргонодуговим зварюванням неплавким електродом із зануреною дугою. Застосування попереднього перед зварюванням пружного деформування листа і ребер жорсткості на рівні $(0,3 \dots 0,4)\sigma_T$ забезпечує усунення зварювальних деформацій та створює необхідні умови для виконання зварювального процесу в автоматичному режимі. Визначено, що ефективним засобом неруйнівного контролю якості зварних швів цих панелей є електронна ширографія. На рис. 12 показано результат такого контролю у розтягнутому стані безпосередньо після зварювання панелі. На загальному фоні деформування досліджуваної ділянки спостерігається локальне викривлення, що свідчить про дефектну зону. Це підтверджує також тривимірна картина деформованої поверхні. Рентгеноконтроль підтвердив наявність скупчення пор в аномальній зоні. Розроблені технології бездеформаційного зварювання і неруйнівного контролю рекомендовані для промислового виробництва авіаційних панелей.

Однією з основних вимог до конструкційних матеріалів для аерокосмічної техніки є питома міцність. Цій вимозі відповідають алюмінієво-літєві сплави різних систем легування, які мають низьку щільність та підвищену питому міцність. Але невивченість зварюваності стримувало застосування цих сплавів у зварних

конструкціях. В ІЕЗ було виконано комплекс досліджень щодо зварюваності алюмінієво-літєвих сплавів. В результаті запропоновано ефективні методи зварювання та присадний матеріал, модифікований скандієм. Досліджено вплив способів зварювання на міцність та тріщиностійкість різних зон з'єднань алюмінієво-літєвих сплавів (рис. 13).

Для вирішення задач геометричної та технологічної адаптації при роботизованому зварюванні відповідальних конструкцій в Інституті розроблено спеціалізовані системи технічного зору



Рис. 14. Зварювальний робот з системою технічного зору [7]

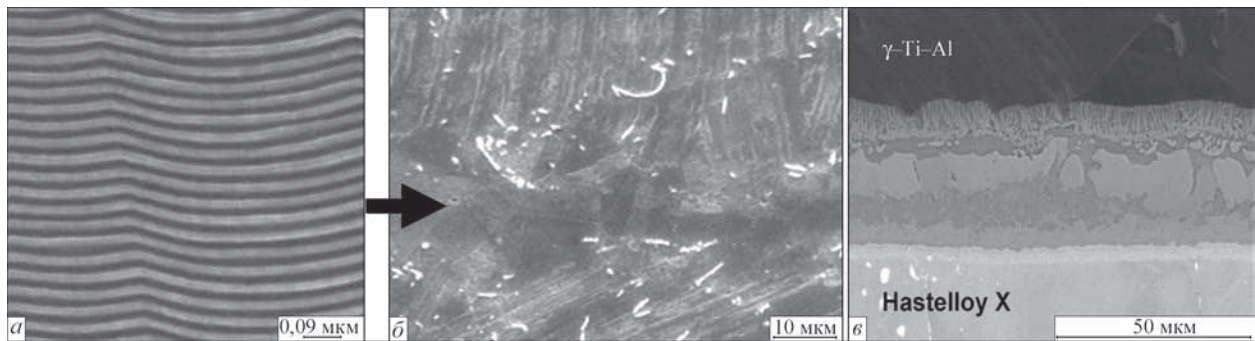


Рис. 15. Структури наночислової фольги та зварних з'єднань, отриманих із застосуванням наноструктурованих матеріалів: *a* — мікроструктура перетину наночислової фольги з шарів титану (темні) і алюмінію (світлі); *б* — мікроструктура зони з'єднання сплава на основі γ -Ti-Al; *в* — мікроструктура зони з'єднання сплава на основі γ -Ti-Al та жаростійкого на основі Ni

(рис. 14). Зварювальні роботи з системами технічного зору автоматично знаходять стик, у масштабі реального часу корегують траєкторію і параметри режиму зварювання для компенсації похибок складання та установки заготовок. Таким чином, виконують зварювальні операції цілком в автоматичному режимі. Системи технічного зору, розроблені в Інституті, з успіхом застосовуються з роботами таких відомих виробників, як ABB, FANUC, KUKA.

Композитні матеріали і інтерметаліди завдяки своїм унікальним властивостям все більше затребовані у багатьох галузях промисловості, будівництві, медицині та ін. Та їх використання стримується браком надійних технологій створення нерознімних з'єднань конструкцій з різнорідних або нових наноструктурованих матеріалів. Застосування традиційних методів зварювання та паяння не забезпечує на практиці характеристик міцності.

Для вирішення цієї проблеми в Інституті розроблено парофазні технології отримання наноструктурованих матеріалів (НМ) з великою протяжністю границь зерен, близьких за хімічним складом до зварюваних матеріалів [8, 9]. На рис. 15 представлено структури деяких отриманих наноматеріалів на основі однофазних та гетерофазних систем. Наноструктуровані матеріали мають високу пластичність при нагріванні і низьку енергію активації дифузійної рухомості сплавів. Застосування таких НМ у якості проміжних прошарків у вигляді фольги (рис. 15, *a*) вирішує проблему зварювання сплавів на основі інтерметалідів та композитів [10, 11]. Також представлено структури з'єднань сплавів на основі інтерметалідів γ -Ti-Al (рис. 15, *б*) та жароміцного сплаву на основі нікелю (рис. 15, *в*). Висока реакційна здібність нанопрошаркових фольг та їх надпластичність при нагріванні в умовах зовнішнього навантаження дає можливість реалізувати процеси реакційного паяння за короткий проміжок часу розігріву зони з'єднання при низькому тиску. Ця технологічна схема може бути використана для ремонт-

них робіт в умовах локального розігріву зони з'єднання при обмеженому доступі до джерел енергії і можливості використання інтенсивних пучків випромінювання, наприклад, в умовах космосу.

Сьогодні у виробництві металевих конструкцій застосовується чимало новітніх матеріалів, але сталь — це основний конструкційний матеріал. В Інституті виконано комплекс досліджень для визначення оптимальних параметрів зварювання високоміцних сталей 10Г2ФБ з мікролегуванням ванадієм і ніобієм, а також сталей 12ГН2МФАЮ, 12ГНЗМФАЮДР [12, 13]. Визначено, що ймовірність утворення холодних тріщин у зварних з'єднаннях високоміцних сталей може бути зведена до мінімуму, якщо використовувати технологію зварювання, що забезпечує охолодження з'єднань зі швидкістю $w_{6/5}$ не більше $10\text{ }^\circ\text{C/s}$, вміст дифузійного водню в наплавленому металі не більше $4\text{ см}^3/100\text{ г}$ та рівень залишкових напружень в з'єднаннях із сталей менше 0,5 межі текучості. Завдяки цим дослідженням розроблено надійні та ефективні технології зварювання високоміцних низьковуглецевих легованих сталей з межею текучості 1000 МПа і вище, які були використані при виготовленні металевих конструкцій покриття НСК «Олімпійський» у м. Києві, сучасних резервуарів великої ємності для зберігання нафти та інших об'єктів.

Надійність — одна з найважливіших якостей, що відрізняє сучасні зварні конструкції. На її забезпечення спрямовано багато технологій, що розробляє Інститут електрозварювання. До їх числа слід віднести технологічні процеси електродинамічного оброблення (ЕДО) і високочастотного механічного проковування (ВМП). Новий технологічний процес, що застосовують після отримання зварних з'єднань — електродинамічна обробка імпульсами електричного струму високої щільності, сприяє підвищенню в'язкості та подрібненню структури металу, дозволяє суттєво зменшити залишкові напруження (рис. 16, *a*) та збільшити опір втомі (рис. 16, *б*) зварних з'єднань. Створене обладнання дозволяє усунути залишкові зварювальні

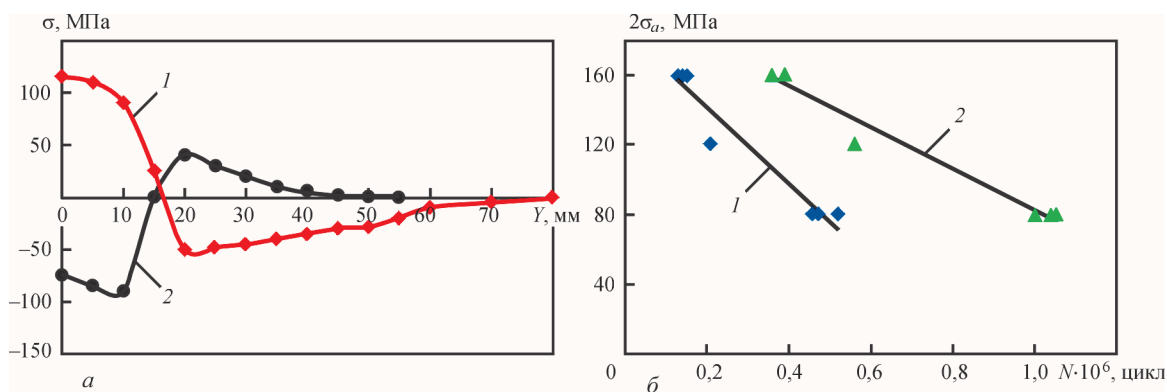


Рис. 16. Вплив ЕДО на залишкові напруження та довговічність зварних з'єднань сплава АМгб, виготовлених зварюванням ТІГ: а — залишкові напруження до обробки (1) та після (2); б — результати втомних випробувань зварних зразків без обробки (1) та з обробкою (2)



Рис. 17. Ручний інструмент та мобільне джерело живлення для ЕДО

деформації жолоблення тонкостінних елементів конструкцій (рис. 17). Розроблені технологія та апаратура забезпечили обробку відповідальних зварних з'єднань суднокорпусних та авіаційних

конструкцій, що сприяло збільшенню їх експлуатаційної надійності та довговічності [14, 15].

Проведені в Інституті дослідження довели, що ефективне зниження інтенсивності корозійно-втомного руйнування зварних з'єднань сталевих металоконструкцій забезпечує застосування технології високочастотного механічного проковування [16–18]. Вплив промислової атмосфери помірного клімату моделювали витримкою зразків таврових та стикових зварних з'єднань розміром 350×70×12 мм із сталі 15ХСНД у камері вологості протягом 1200 год при температурі 40 °С і вологості повітря 98 %. Втомні випробування зразків проводили при віддільовому змінному розтягуванні з частотою 5 Гц. Відповідні криві втоми досліджуваних з'єднань приведені на рис. 18. Результати досліджень свідчать, що границі обмеженої витривалості на базі 2 млн циклів таврових і стикових зварних з'єднань підвищуються на 47 та 39 % відповідно; циклічна довговічність зварних з'єднань збіль-

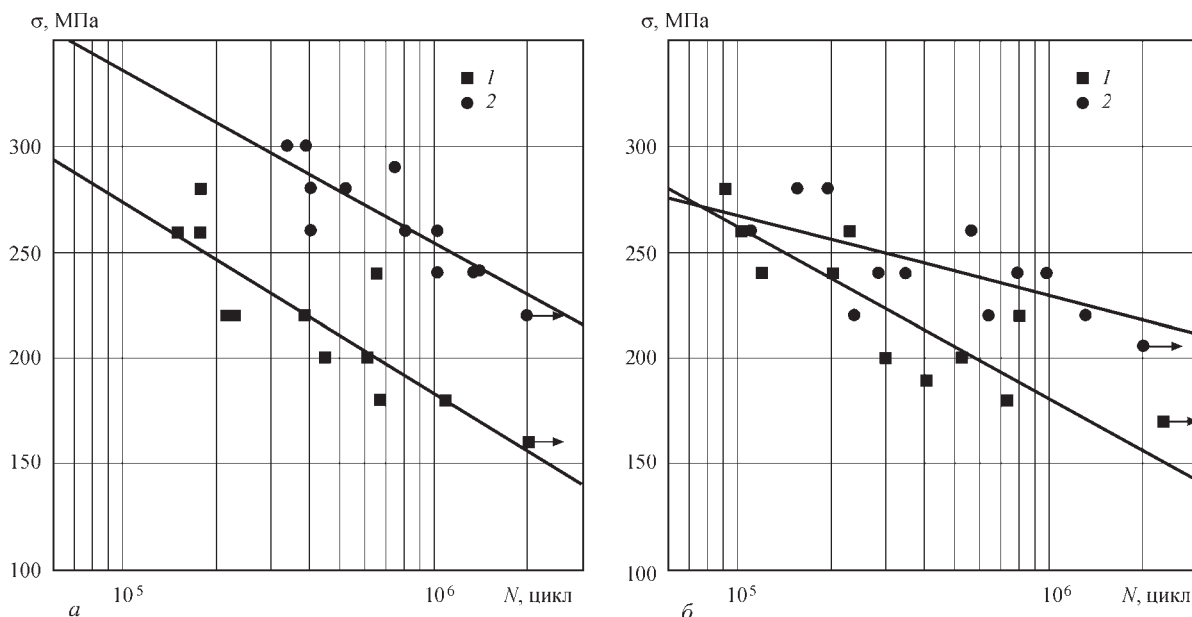


Рис. 18. Криві втоми таврових (а) та стикових (б) зварних з'єднань сталі 15ХСНД при впливі промислової атмосфери помірного клімату на протязі 1200 год: 1 — у вихідному стані; 2 — після обробки за технологією ВМП



Рис. 19. Центробіжне колесо компресора газотурбінного двигуна, яке виготовлено із застосуванням нового припою шується до 7 разів в залежності від рівнів прикладених навантажень.

Створення надійних та продуктивних технологій і обладнання для підвищення зносостійкості деталей традиційно займає значне місце у тематиці досліджень Інституту. Вони затребувані у галузях металургійної, енергетичної промисловості, сільськогосподарському машинобудуванні та ін. Виконані комплексні дослідження основних закономірностей впливу технологічних параметрів дугового наплавлення на особливості формування структури та зміну фізико-механічних властивостей наплавлень по шару в залежності від вмісту вуглецю в колісних сталях, що коливається в діапазоні від 0,55 до 0,75 %, сприяли розробці нової технології дугового наплавлення для відновлення колісних пар вантажних вагонів [19], що містить спосіб та режими наплавлення, вимоги до підготовки коліс, хімічного складу наплавних матеріалів, попереднього підігріву, температура якого залежить від вмісту вуглецю в колісній сталі. Важливою особливістю цієї технології є уповільнене охолодження після наплавлення зі швидкістю $\leq 35 \dots 40$ °C/год протягом 4...5 год. Застосування нової технології дозволило збільшити ударну в'язкість металу зони термічного впливу, опір наплавленого металу крихкому руйнуванню до 2...3 разів. Ресурс безпечної експлуатації залізничних коліс збільшився в два рази.

Роботи Інституту електрозварювання в області паяння, що були запроваджені на початку 1960-х років, внесли значний вклад у цей напрям. Розроблені наукові основи вакуумного паяння тонкостінних конструкцій з нержавіючих сталей різних класів були використані для одержання виробів відповідального призначення — стільникових панелей, антен тощо. У теперішній час вивчення фізико-металургійних процесів, які відбуваються під час високотемпературного вакуумного паяння жароміцних дисперсійно-твердіючих нікелевих сплавів, закономірностей структуроутворення паяних з'єднань дозволило створити припій системи Ni-Pd-Cr-1Ge. В якості депресанта було застосовано германій, який забезпечує структуру твердого розчину на основі паладію у



Рис. 20. Портативне цифрове рентгенотелевізійне обладнання, що розміщено на об'єкті

паяних швах. Паяні з'єднання мають стабільну статичну міцність 1230...1290 МПа при кімнатній температурі та 1000...1030 МПа при температурі 550 °C, що більше майже у два рази у порівнянні з промисловим припоєм. Із застосуванням створеного припою виготовляються відцентрові колеса осьового компресора газотурбінного двигуна з дисперсійно-твердіючого нікелевого сплаву (рис. 19) та інші вироби.

Успішний розвиток зварювальних технологій та створення довговічних надійних конструкцій відповідального призначення неможливо без застосування дефектоскопії та сучасних методів неруйнівного контролю якості зварних з'єднань.

Значним досягненням останніх років є створення портативного цифрового рентгенотелевізійного обладнання (рис. 20) на основі високочутливих твердотільних перетворювачів. Портативність, цифрове оброблення зображень, низька вартість відкривають нові можливості для виконання радіаційного контролю в польових та цехових умовах різних об'єктів, які на сьогодні не забезпечені можливостями неруйнівного контролю. Застосування портативного рентгенотелевізійного комплексу допомагає вирішенню проблеми контролю численних газо-, нафто- і гідророзподільчих трубопроводів малого діаметру, технологічних трубопроводів нафтохімічного виробництва.

Автоматизація та роботизація процесів неруйнівного контролю дає можливість суттєво підвищити достовірність прийняття рішень про дефектність виробів та виключити вплив людського фактору. Для неруйнівного контролю виробів складної геометрії створено комплекс, до якого входить промисловий робот з системою технічного зору (рис. 21). Ідентифікацію геометрії об'єкта контролю (ОК), сканування його поверхні вихротоковими датчиками комплекс «Каскад» виконує без участі людини. Він дозволяє: визначити положення ОК за допомогою системи технічного зору; автоматично підтримувати фіксований проміжок



Рис. 21. Робот з системою технічного зору для неруйнівного контролю виробів складної геометрії [20]

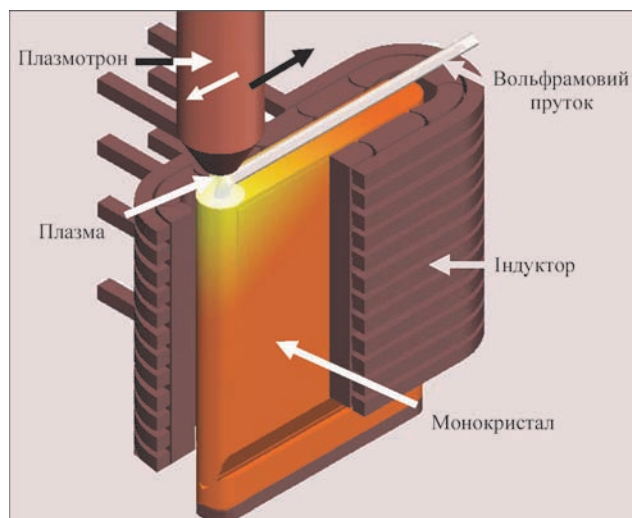


Рис. 22. Схема устаткування для вирощування монокристалів тугоплавких металів



Рис. 23. Монокристали вольфраму

між датчиками та ОК; стабілізувати швидкість переміщення вихретокового перетворювача на поверхні ОК; формувати паспорт дефектності виробів із зазначенням просторових координат дефектів; забезпечити високу продуктивність контролю.



Рис. 24. Апарат для зварювання живих тканин ЕКВ3-300 «Патонмед»

В Інституті успішно продовжує розвиватися металургійний напрямок — спецеелектрометалургія, яка забезпечує створення високоякісних сталей. Але її можливості цим не вичерпуються. Як виявилось, засобами спецеелектрометалургії можливо вирощувати монокристали великих розмірів, що зробити за традиційною технологією неможливо. Успішно реалізується на практиці розроблений в Інституті принципово новий спосіб вирощування монокристалів тугоплавких металів, в якому одночасно використовується два різних джерела електричного нагрівання — плазмово-дуговий та індукційний (рис. 22) [21]. Плазмово-дуговий здійснює переплавлення витратного матеріалу (прутка) і формує тіло монокристала заданої конфігурації, індукційний — утримує локальну металеву ванну від проливів і створює необхідне температурне поле у кристалі, кристал росте при високій температурі підігріву $(0,5 \dots 0,6) T_{пл}$ [22]. В результаті знижується напруження і щільність дислокацій (менше ніж 10^6 см^{-2}) в зростаючому кристалі, що сприяє створенню більш довершеної монокристалічної структури. Підігрів монокристала до вищезазначеної температури — один із ключових елементів цієї технології. Створено унікальне устаткування для виробництва великих монокристалів вольфраму і молібдену у вигляді пластин розміром $20 \times 170 \times 160$ мм (рис. 23). Ця технологія відноситься до адитивних технологій високого рівня [23].

Зварювання, залишаючись одним з основних технологічних процесів в різних галузях промисловості, поширилось в зовсім нову для себе сферу — медицину. І зараз ми можемо констатувати, що здійснилася мрія хірургів про швидке та безкровне роз'єднання та з'єднання живої тканини без застосування шовного матеріалу.

Інститут у творчому співробітництві з провідними медичними закладами України створив технологію та обладнання (рис. 24) для високочастотного зварювання м'яких живих тканин [24–28]. На даний час розроблено і застосовується біля 200 різних хірургічних методик, за якими щорічно виконується 35...40 тис. операцій в таких областях,



Рис. 25. Багатофункціональний термохірургічний апарат ЕК-300 МШ «Патонмед» та хірургічний інструментарій

як абдомінальна і торакальна хірургія, травматологія, пульмонологія, проктологія, урологія, мамологія, офтальмологія, нейрохірургія та інші. Створена та продовжує удосконалюватись апаратура та інструментарій для високочастотного зварювання живих тканин. Слід зазначити, що багато країн світу зацікавлені цією технологією.

Але на цьому ми не зупиняємось. В Інституті створено новий процес безконтактної конвекційно-інфрачервоної обробки живих тканин. Він пройшов всебічну перевірку і довів свою ефективність. З його використанням здійснюється як перша допомога, так і спеціалізована хірургічна. Він дає можливість зупинити кровотечі з паренхіматозних органів, губчатих кісток і судин невеликого діаметру, санувати інфіковані та хронічні гнійні рани при травмах, коагулювати тканини для проведення безкровного розсічення, здійснювати термоабляцію пухлин і метастазів. Кожна з розглянутих технологій має свої переваги і свої застосування. Об'єднання їх у одному апараті дозволяє збільшити можливості хірургів (рис. 25).

Далеко неповний огляд наших робіт свідчить, що на основі проблемно-орієнтованих фундаментальних досліджень в Інституті електрозварювання успішно створюються нові наукові технології та обладнання. Ми й надалі будемо активно працювати над такими дослідженнями та розробками, які матимуть перспективу та будуть затребувані на світовому ринку зварювальної техніки.

Список літератури

1. Korzhik V. N., Pashchin N. A., Mikhoduj O. L. et al. (2017) Comparative evaluation of methods of arc and hybrid plasma-arc welding of aluminum alloy 1561 using consumable electrode. *The Paton Welding J.*, **4**, 30-34.
2. Korzhik V. N., Sydorets V. N., Shanguo Han, Babich A. A. (2017) Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding of thin-walled structures. *Ibid*, **5**, 62-70.
3. Hamm R.W. (2008) Reviews of accelerator science and technology. *Industrial Accelerators*, **1**, 163-184.
4. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Нестеренков В. М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом электрон-

- но-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия. *Автоматическая сварка*, **5**, 3-7.
5. Maksimov S. (2017) E. O. Paton Electric Welding Institute activity in the field of underwater welding and cutting. *Літводні технології*, **6**, 37-45.
6. Патон Б. Е., Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Пичак В. Г., Полосков С. И. (2011) Совершенствование оборудования для подводной механизированной и автоматизированной сварки и резки порошковой проволокой. *Сварка и Диагностика*, **5**, 54-59.
7. Шаповалов Е. В., Долиненко В. В., Коляда В. А. и др. (2016) Применение роботизированной и механизированной сварки в условиях возмущающих факторов. *Автоматическая сварка*, **7**, 46-51.
8. Ustinov A. I., Polishchuk S. S., Demchenkov S. A., Petrushinets L. V. (2015) Effect of microstructure of vacuum-deposited Fe100-xNix (30<x<39) foils with FCC structure on their mechanical properties. *J. Alloys and Compounds*, **622**, 54-61.
9. Ustinov A. I. (2008) Dissipative properties of nanostructured materials. *Strength of Materials*, **40**, 571-576.
10. Ustinov A., Falchenko Yu., Ishchenko A. (2008) Diffusion welding of γ -TiAl alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **16**, 1043-1045.
11. Ustinov A., Falchenko Yu., Melnichenko T. (2013) Diffusion welding of aluminum alloy strengthened by Al₂O₃ particles through an Al/Cu multilayer foil. *J. of Materials Processing Technology*, **213**, **4**, 543-552.
12. Позняков В. Д., Довженко В. А., Жданов С. Л. и др. (2010) Структурные превращения при сварке стали 10Г2ФБ и свойства сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **11**, 12-16.
13. Позняков В. Д., Синеок А. Г., Жданов С. Л., Максименко А. А. (2011) Опыт применения стали S355J2 в металлоконструкциях перекрытия над НСК «Олимпийский». *Там же*, **6**, 54-55.
14. Lobanov L. M., Paschin N. A., Mihoduy O. L. (2014) Repair the AMr6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld Research and Application*, **1**, 55-62.
15. Лобанов Л. М., Пашин Н. А., Савицкий В. В., Миходуй О. Л. (2014) Исследование остаточных напряжений в сварных соединениях жаропрочного сплава МЛ10 с применением электродинамической обработки. *Проблемы прочности*, **6**, 33-41.
16. Knysh, V. V., Solovei, S. A., Kadyshev, A. A., Nyrkova, L. I., Osadchuk, S. A. (2017) Influence of High-Frequency Peening on the Corrosion Fatigue of Welded Joints. *Materials Science*, **53**, 7-13.
17. Daavary M., Sadough Vanini S.A. (2015) Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment. *Materials Letter*, **139**, 462-466.
18. Fan Y., Zhao X., Liu Y. (2016) Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*, **94**, 515-522.
19. Позняков В. Д., Гайворонський О. А., Клапатюк А. В. (2014) Спосіб відновлення виробів з високовуглецевих сталей. Україна, Пат. 107301.
20. Долиненко В. В., Шаповалов С. В., Скуба Т. Г. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумного контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, **5-6** (764), 60-67.
21. Патон Б. Е., Шаповалов В. А., Григоренко Г. М. и др. (2016) Плазменно-индукционное выращивание профилированных монокристаллов тугоплавких металлов. Киев, Наукова думка.
22. Шаповалов В. А., Якуша В. В., Никитенко Ю. А. (2014) Изучение температурного поля профилированных монокристаллов вольфрама, получаемых плазменно-индукционным способом. *Современная электрометаллургия*, **3**, 31-35.
23. Шаповалов В. А., Якуша В. В., Гниздыло А. Н., Никитенко Ю. А. (2016) Применение аддитивных технологий для выращивания крупных профилированных монокри-

- сталлов вольфрама и молибдена. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 145-147.
24. *Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия* (2009) Патон Б. Е., Иванова О. Н. (редакторы). Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Международная Ассоциация «Сварка».
 25. Патон Б. Е., Кривцун И. В., Маринский Г. С. и др. (2013) Высокочастотная сварка и термическая обработка живых тканей в хирургии. *Наука і практика*, **1**, 25-39.
 26. Патон Б. Е., Маринский Г. С., Подпратов С. Е., Ткаченко В. А., Ткаченко С. В., Чвертко Н. А., Чернець О. В. (2012) *Електрокоагулятор високочастотний зварювальний ЕКВЗ-300*. Україна, Пат. 72577U, МПК А 61 В 18/12.
 27. Патон Б. Е., Кривцун И. В., Маринский Г. С., Матвійчук Г. М. (2013) Сварка, резка и термическая обработка живых тканей, *Автоматическая сварка*, **10-11**, 135-146.
 28. Патон Б. Е., Ткаченко В. А., Маринский Г. С., Матвійчук Г. М. (2014) *Способ з'єднання біологічних тканин людей і тварин з використанням високочастотного струму*. Україна Пат. 106513.
 12. Zhdanov, S.L., Poznyakov, V.D., Maksimenko, A.A. et al. (2010) Structure and properties of arc-welded joints on steel 10G2FB. *The Paton Welding J.*, **11**, 8-12.
 13. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Sineok, A.G. et al. (2011) Experience of application of S355J2 steel in metal structures of the roofing over NSC «Olimpijsky» (Kiev). *Ibid.*, **6**, 45-46.
 14. Lobanov, L.M., Paschin, N.A., Mihoduy, O.L. (2014) Repair the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld Research and Application*, **1**, 55-62.
 15. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Savitsky, V.V., Mikhoduj, O.L. (2014) Investigation of residual stresses in welded joints of heat-resistant alloy ML10 using electrodynamic treatment. *Problemy Prochnosti*, **6**, 33-41 [in Russian].
 16. Knysh, V.V., Solovei, S.A., Kadyshev, A.A., Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.A. (2017) Influence of high-frequency peening on the corrosion fatigue of welded joints. *Materials Sci.*, **53**, 7-13.
 17. Daavary, M., Sadough Vanini, S.A. (2015) Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment. *Materials Letter*, **139**, 462-466.
 18. Fan, Y., Zhao, X., Liu, Y. (2016) Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*, **94**, 515-522.
 19. Gajvoronsky, O.A., Poznyakov, V.D., Klapatyuk, A.V. (2014) *Method of restoration of high-carbon steel products*. Pat. 107301, Ukraine [in Ukrainian].
 20. Dolinenko, V.V., Shapovalov, E.V., Skuba, T.G. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 51-57.
 21. Paton, B.E., Shapovalov, V.A., Grigorenko, G.M. et al. (2016) *Plasma-induction growing of profiled single crystals of refractory metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
 22. Shapovalov, V.A., Yakusha, V.V., Nikitenko, Yu.A. et al. (2014) Studying the temperature field of profiled tungsten single-crystals produced by plasma-induction process. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 31-35 [in Russian].
 23. Shapovalov, V.A., Yakusha, V.V., Gnizdylo, A.N., Nikitenko, Yu.A. (2016) Application of additive technologies for growing large profiled single crystals of tungsten and molybdenum. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 134-136.
 24. (2009) *Tissue-saving high-frequency electric welding surgery*. Ed. by B.E. Paton, O.N. Ivanova. Kiev, PWI, IAW [in Russian].
 25. Paton, B.E., Krivtsun, I.V., Marinsky, G.S. et al. (2013) High-frequency welding and thermal treatment of live tissues in surgery. *Nauka і Praktyka*, **1**, 25-39 [in Russian].
 26. Paton, B.E., Marinsky, G.S., Podpратov, S.E. et al. (2012) *Welding high-frequency electrocoagulator ЕКВЗ-300*. Pat. 72577U, Ukraine, Int. Cl. A61 B 18/12 [in Ukrainian].
 27. Paton, B.E., Krivtsun, I.V., Marinsky, G.S. et al. (2013) Welding, cutting and heat treatment of live tissues. *The Paton Welding J.*, **10-11**, 142-153.
 28. Paton, B.E., Tkachenko, V.A., Marinsky, G.S., Matviichuk, G.M. (2014) *Method of joining human and animal biological tissues using high-frequency current*. Pat. 106513, Ukraine [in Ukrainian].

References

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА В ОБЛАСТИ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Б. Е. ПАТОН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлен ряд новых разработок Института электросварки, созданных в последнее время, а именно, технологии и оборудование для сварки с применением высококонцентрированных источников энергии — плазмы, лазера, электронного луча. Созданы технологии для сварки труб, титана больших толщин, алюминийево-литиевых сплавов, высокопрочных сталей. Разработаны парофазные технологии получения наноструктурированных материалов для сварки композитных материалов и интерметаллидов. Созданы технологии и оборудование для сварки и резки под водой, новый

электронно-лучевой инструмент для сварочных работ в открытом космосе. Для повышения долговечности и надежности сварного шва предложена послесварочная обработка — импульсами электрического тока высокой плотности и высокочастотная механическая проковка. Для контроля качества сварных конструкций создано цифровое оборудование на основе высокочувствительных твердотельных преобразователей, а для изделий сложной геометрии — промышленный робот с системой технического зрения. Разработан новый способ выращивания монокристаллов тугоплавких металлов. Представлена новая аппаратура для сварки живых тканей. Библиогр. 28, табл. 2, рис. 25.

Ключевые слова: сварка плазменная, лазерная, электронно-лучевая, контактная, титан, алюминиево-литиевые сплавы, прочность, контроль качества, наплавка, монокристаллы, сварка живых тканей

ADVANCED STUDIES AND DEVELOPMENTS OF THE E.O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE IN THE FIELD OF WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES

B.E. PATON

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11, Kazimir Malevich str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

A number of recent new developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute is presented, namely the technologies and equipment for welding with applying the highly-concentrated power sources: plasma, laser and electron ones. Technologies were developed for welding of pipes, thick titanium, aluminium – lithium alloys, high-strength steels. The vapor-phase technologies were developed for producing nanostructured materials for welding composite materials and intermetallics. Technologies and equipment for underwater welding and cutting, new electron beam tool for welding in open space were developed. To increase the life and safety of the weld, the postweld treatment was suggested by using the high-density electric pulses and high-frequency mechanical peening. To control the quality of welded joints, the designed digital equipment, based on high-sensitive solid-body converters and an industrial robot with a technical vision system for products of intricate geometry were developed. The new method was developed for growing refractory metal single crystals. New equipment is presented for welding of live tissues. 28 Ref., 2 Tabl., Fig. 25.

Keywords: plasma, laser, electron beam and resistance welding, titanium, aluminium-lithium alloys, quality control, surfacing, single crystals, welding of live tissues

Надійшла до редакції 30.10.2018

Технологии ИЭС доступны...

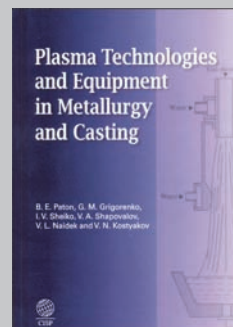
Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве / Б. Е. Патон, Г. М. Григоренко, И. В. Шейко и др. Киев: Наук. думка, 2013. – 488 с.



В монографии приведены научные и прикладные аспекты применения плазменных источников нагрева (плазмотронов) в металлургическом и литейном производстве. Рассмотрены основные типы плазмотронов, используемые для плавки металлов и обработки металлических расплавов в лабораторных и промышленных условиях.

Показано промышленное применение плазменных источников нагрева, на базе которых разработаны новые металлургические процессы и технологии. Описаны конструкции плавильных печей на керамическом поду и переплавных печей с формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе, установок для рафинирующего переплава поверхностного слоя слитков, выращивания монокристаллов тугоплавких металлов и др. Приведены результаты сравнения качества металлов и сплавов, выплавленных с применением различных технологий.

Для научных и инженерно-технических работников металлургических предприятий и литейного производства, а также для преподавателей, аспирантов и студентов высшей школы соответствующих специальностей.



Книга переиздана в Великобритании на английском языке в 2015 г. и в Китае на китайском в 2018 г.