

**Сучасні дослідження та розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона
в галузі зварювання та споріднених технологій**

Шановні колеги!

Дозвольте представити результати досліджень та розробок Інституту електрозварювання, що виконані в останні роки з урахуванням тенденцій розвитку сучасних напрямків зварювальної науки і техніки.

Значним досягненням останніх років є створення гібридного плазмово-дугового зварювання. Об'єднання двох зварювальних джерел живлення забезпечує більшу глибину проплавлення основного металу. Розроблена технологія зварювання сталей та алюмінієвих сплавів завтовшки 5...12мм, у порівнянні з імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом дозволяє збільшити швидкість зварювання на 25...40%, зменшити витрати зварювального дроту на 40%. Для реалізації цієї технології створено плазмотрон оригінальної конструкції та відпрацьовані базові технологічні процеси.

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

можливість одностороннього доступу, забезпечує катодне очищення зварюваних поверхонь алюмінієвих сплавів та високу продуктивність процесу і менші енерговитрати.

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

Традиційно в Інституті продовжуються дослідження і розробки з використанням лазерних і електронно-променевих джерел живлення. На основі сучасних волоконних дискових та діодних лазерів високої надійності створено технологію і автоматизоване обладнання для лазерного зварювання високоміцних і нержавіючих сталей, алюмінієвих і титанових сплавів, які використовуються для виготовлення різних виробів. Наприклад, для зварювання тонкостінних труб різного діаметру з нержавіючих сталей для

виробництва багат шарових сильфонів. Створене лазерне зварювальне обладнання з успіхом застосовується у вагоно-, авто – та кораблебудуванні, а для монтажних робіт в цих галузях створено напівавтоматичний ручний лазерний інструмент потужністю до 2KW.

У створенні обладнання для електронно-променевого зварювання Інститут займає одне з провідних місць у світі. Його продукція експортується до багатьох країн світу. Новітні камери мають механічне обладнання з рухомою електронно-променевою зварювальною гарматою на прецизійному багатівісьовому механізмі переміщення. Обертання зварювальної деталі забезпечується прецизійними зварювальними маніпуляторами, що дає можливість здійснювати зварювання складних авіаційних вузлів із змінною геометрією. В залежності від призначення камера комплектується високовольтними інверторними зварювальними джерелами живлення потужністю 15,30 та 60 кВт та системою вторинно-емісійної електронної візуалізації «РАСТР», яка формує відображення зони зварювання як перед, під час та після завершення зварювання.

Інститут має успішний досвід створення електронно-променевого обладнання та технологій космічного призначення. Проведені розробки нового покоління електронно-променевого інструменту для зварювання при виконанні монтажних та ремонтно-відновлювальних робіт у відкритому космосі. Інструмент оснащений електронно-

променевою гарматою потужністю до 2,5 кВт, відокремленою від високовольтного джерела живлення. Вага гармати складає 3 кг. Інструмент може працювати в ручному і автоматичному режимі з використанням робототехнічного устаткування або маніпуляторів.

Традиційно інститут приділяє значну увагу трубній тематиці. В останні роки проведені дослідження та створені технології і обладнання для пресового зварювання магнітокерованою дугою неповоротних з'єднань з товщиною стінок до 10 мм і діаметром до 200 мм з високоміцних сталей. В таблиці 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, забезпечуючи зварювання у польових та стаціонарних умовах.

Підводне зварювання – один із напрямків досліджень і розробок Інституту, де наші вчені зробили значні науково-технічні прориви. 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 мокрого зварювання маловуглецевих, низьколегованих та сталей підвищеної міцності. Для дугового різання сталей і сплавів під водою на глибині до 200 м, створені електроди та порошковий дріт, а

також новий тип напівавтомату, подавальний механізм якого знаходиться під водою поруч з водолазом – зварником. Механічні властивості металу швів, результати яких представлені в таблиці, довели високу якість робіт, що виконуються запропонованою технологією підводного зварювання. Порівняння результатів показників міцності зварних з'єднань при циклічному навантаженні показало, що вони не поступаються з'єднанням, виконаним за звичайних умов.

Титан - один із основних сучасних конструкційних матеріалів, що використовується у багатьох галузях промисловості при створенні відповідальних конструкцій. Інститут постійно і всебічно займається дослідженням проблем зварювання титану. Так, успішно розроблено технології зварювання виробів із титану середніх і великих товщин у вузьку обробку вольфрамовим електродом. Для гарантованого сплавлення бокових стінок зі зварним швом застосовано кероване змінне магнітне поле. Створено спеціалізовану установку для зварювання з'єднань товщиною до 110 мм та довжиною до 4 метрів. Із застосуванням цього обладнання виконано зварювання високоміцних титанових сплавів різної товщини. Дослідження зварних з'єднань підтвердили їх високу якість. Рівень міцності зварних з'єднань досягає 95% від міцності основного металу.

В Інституті проведено комплекс досліджень щодо розроблення технології бездеформаційного зварювання

стрингерних панелей із високоміцного титанового сплаву ВТ-20. Доведено, що виконання проплавних швів аргоно-дуговим зварюванням неплавким електродом по шару активуючого флюсу з використанням попереднього пружного деформування і високочастотної механічної проковки швів забезпечує вищі показники втомленосної довговічності таких панелей. Застосування попереднього перед зварюванням пружного деформування листа і ребер жорсткості на рівні $0,3 \div 0,4\sigma_t$ 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 слайді показано результат такого контролю 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 скупчених 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. Цим вимогам 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 Інституті був виконаний комплекс досліджень щодо зварюваності алюмінієво - літєвих сплавів. В результаті запропоновані ефективні методи зварювання і присадковий матеріал, модифікований скандієм. Досліджено вплив технологій зварювання на міцність та тріщиностійкість різних зон з'єднань алюмінієво – літєвих сплавів.

Для вирішення задач геометричної та технологічної адаптації при роботизованому зварюванні відповідальних конструкцій розроблено спеціалізовані системи технічного зору. Зварювальні роботи з системами технічного зору автоматично знаходять стик, у масштабі реального часу корегують траєкторію і параметри режиму зварювання для компенсації похибок збірки та установки заготовок. Таким чином, виконуються 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 затребувані у багатьох галузях промисловості, будівництві, медицині і ін. Та їх використання стримується браком надійних технологій отримання нероз'ємних з'єднань конструкцій з різнорідних або нових наноструктурованих матеріалів. Застосування

традиційних методів зварювання та пайки не забезпечує на практиці характеристик міцності.

Для вирішення цієї проблеми в інституті розроблені парофазні технології отримання наноструктурованих матеріалів з великою протяжністю границь зерен, близьких за хімічним складом до зварюваних матеріалів. Застосування таких наноматеріалів у якості проміжних прошарків у вигляді фольги вирішує проблему зварювання сплавів на основі інтерметалідів та композитів. 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 ремонтних робіт у 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 легованих сталей з границею плинності 1000МПа і вище. Визначено, що ймовірність утворення холодних тріщин у зварних з'єднань високоміцних сталей може бути зведена до мінімуму, якщо

використовувати технологію зварювання, яка забезпечує охолодження з'єднань у діапазоні температур 500-600 градусів із швидкістю не більше 10 градусів у секунду, 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 границі плинності. Завдяки цим дослідженням розроблені надійні та ефективні технології зварювання, які були використані при виготовленні металевих конструкцій відповідального призначення, зокрема мостових переходів, покриття спортивного комплексу «Олімпійський» у м. Києві, сучасних резервуарів великої ємкості для зберігання нафти та інших об'єктів.

Надійність – одно з найважливіших якостей, що вирізняють сучасні зварні конструкції. На її забезпечення спрямовано багато сучасних технологій, що розробляє Інститут. До їх числа слід віднести створені в Інституті технологічний процес електродинамічного оброблення і високочастотне механічне проковування.

Новий технологічний процес післязварювальної обробки зварних з'єднань – електродинамічна обробка імпульсами електричного струму високої щільності сприяє підвищенню в'язкості та подрібненню структури металу, дозволяє суттєво зменшити залишкові напруження та збільшити опір втомі зварних з'єднань. Створене обладнання дозволяє усунути залишкові зварювальні деформації короблення тонкостінних елементів конструкцій. Розроблені технологія та апаратура

забезпечили обробку відповідальних зварних з'єднань суднокорпусних та авіаційних конструкцій, що сприяло збільшенню їх експлуатаційній надійності та довговічності.

Дослідження, проведені в Інституті, довели, що ефективно підвищення корозійно-втомної міцності зварних з'єднань сталевих металоконструкцій забезпечує застосування технології високочастотного механічного проковування. Вплив промислової атмосфери помірного клімату моделювали витримкою зразків таврових та стикових зварних з'єднань із сталі 15 ХСНД у камері протягом 1200 годин при температурі 40° і вологості повітря 98%. Відповідні криві втоми досліджуваних з'єднань приведені на слайді. Результати досліджень свідчать, що границі обмеженої витривалості на базі 2 млн. циклів таврових і стикових зварних з'єднань підвищується на 47% та 39% відповідно; циклічна довговічність зварних з'єднань збільшується до 7 разів в залежності від рівнів прикладених навантажень.

Створення надійних і продуктивних технологій та обладнання для підвищення зносостійкості деталей традиційно займає значне місце у тематиці досліджень Інституту. Виконані дослідження основних закономірностей впливу технологічних параметрів дугового наплавлення на особливості формування структури та зміну фізико – механічних властивостей наплавлень в залежності від вмісту вуглецю в колісних сталях, що коливається в діапазоні від 0,55 до 0,75%, дозволили розробити нову технологію

дугового наплавлення для відновлення колісних пар вантажних вагонів. Важливою особливістю цієї технології є уповільнене охолодження після наплавлення зі швидкістю $\leq 35 - 40^{\circ}\text{C}$ (в годину) протягом 4 -5 годин. Застосування нової технології дозволило збільшити опір наплавного металу крихкому руйнуванню у 2--3 рази. Ресурс безпечної експлуатації залізничних коліс збільшився у два рази.

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

Значним досягненням останніх років є створення портативного цифрового рентгено – телевізійного обладнання на основі високочутливих твердотільних перетворювачів. Портативність, цифрова обробка зображень, низька вартість такого обладнання відкривають нові можливості для виконання радіаційного контролю в польових та цехових умовах різних об'єктів, які на сьогодні не забезпечені можливостями неруйнівного контролю.

Автоматизація і 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 та система технічного зору. Ідентифікацію геометрії об'єкта контролю, сканування його

поверхні вихреструмові датчиками, комплекс виконує без участі людини. Він дозволяє формувати паспорт дефектності виробів із зазначенням просторових координат дефектів і забезпечити високу продуктивність контролю.

В Інституті успішно продовжує розвиватися металургійний напрямок – спецелектрометалургія, яка забезпечує створення високоякісних сталей. Але, її можливості цим не вичерпуються. Як виявилось, засобами спецелектрометалургії 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. Плазмово-дуговий здійснює переплавлення витратного матеріалу і формує тіло монокристала заданої конфігурації, індукційний – утримує локальну металічну ванну від проливів і створює необхідне температурне поле у кристалі. Створено унікальне виробництво, яке дозволяє вирощувати великі монокристали вольфраму і молібдену у вигляді пластин. Ця технологія відноситься до адитивних технологій високого рівня.

Зварювання, залишаючись одним з основних технологічних процесів в різних галузях промисловості, прорвалось 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 високочастотного зварювання м'яких живих тканин. На даний час розроблено і застосовується біля 200 різних хірургічних методик, за якими щорічно виконується 35 – 40 тисяч операцій в таких областях, як 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 зупиняти кровотечі, санювати інфіковані та хронічні гнійні рани при травмах, коагулювати тканини для проведення безкровного розсічення, здійснювати термоабляцію опухолей і метастазів.

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.

Дякую за увагу!