



НЕСТЕРЕНКОВ

Володимир Михайлович — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу фізичних процесів, техніки і устаткування для електронно-променевого і лазерного зварювання Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ, РАКЕТО- ТА ЛІТАКОБУДУВАННІ, МЕДИЦИНІ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 29 листопада 2023 року

У доповіді наведено найбільш вагомні результати фундаментальних та прикладних досліджень, проведених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, зі створення електронно-променевих технологій та обладнання для їх реалізації в різних галузях промисловості України.

Шановний Анатолію Глібовичу!
Шановні присутні!

В останні роки електронно-променеві технології знайшли широке застосування в багатьох виробничих процесах при виготовленні конструкцій енергетики, ракетно- та літакобудування, медицини, хімічного та загального машинобудування. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України приділялася і приділяється велика увага дослідженням фізичних процесів взаємодії електронних пучків великої потужності з металами та сплавами і розробленню на цій основі технологічних процесів для промисловості. Створене в Інституті нове покоління електронно-променевого обладнання дозволяє вирішувати завдання щодо з'єднання елементів складних конструкцій у різних галузях промисловості, насамперед в авіаційній та космічній, які посідають провідне місце з використання легких та міцних сплавів кольорових металів.

Усі ці установки умовно можна поділити на кілька типів за габаритами зварювальних камер, а відповідно, і за розмірами деталей, що зварюються: «малі» (0,26—5,70 м³), «середні» (19—42 м³) і «великі» (80—100 м³). Інститут розробляє та виготовляє безліч варіацій розмірів зварювальних камер і відповідних конфігурацій вакуумної системи, а також конфігурацій механізму переміщення електронно-променевої гармати та/або деталі, що зварюється, під конкретні завдання замовників, а саме,

розміри та форму зварюваних вузлів, тип і розташування. Це так звані спеціальні установки. Крім самого устаткування, розробляється й конкретна технологія зварювання таких вузлів, тобто замовник отримує зварювальну установку разом із технологією електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) конкретного переліку виробів. Аналогічної технічної ідеології дотримуються відомі виробники ЕПЗ-обладнання: Sciaky Inc. (США), PTR Group (Німеччина), Techmeta (Франція).

Наші електронно-променеві зварювальні установки з малими вакуумними камерами (<math><10\text{ м}^3</math>) (рис. 1) працюють як в Україні, так і в багатьох інших країнах світу, таких як США, Індія, Китай, Нідерланди та ін. Вони призначені для виготовлення елементів електроніки, датчиків, діафрагм, гіроскопів тощо. Системи обертання та переміщення, застосовані в таких малогабаритних установках, забезпечують високу точність виготовлення виробів.

Середньогабаритні установки (рис. 2) виявилися найбільш універсальними з точки зору кількості та різноманітності робіт, що виконуються на них. Вони оснащені вертикальними, горизонтальними та похилими обертачами виробів. Внутрішньокамерна електронно-променева гармата кріпиться на прецизійному механізмі багатовісного переміщення. Цей механізм забезпечує керований ЧПУ лінійний рух гармати вздовж трьох декартових координатних осей (вздовж камери — X, поперек камери — Y і вертикально — Z), а також поворот гармати на кут $0\text{--}90^\circ$ в площині Z-X (від вертикальної орієнтації гармати до горизонтальної), що забезпечує можливість зварювання виробів зі складною просторовою геометрією.

У середньогабаритних установках з об'ємом вакуумних камер $19\text{--}42\text{ м}^3$ робочий вакуум $2\cdot 10^{-4}$ торр за допомогою сучасних засобів відкачування досягається за $18\text{--}20$ хвилин. За необхідності можлива комплектація вакуумної системи, що забезпечує протягом менш як 20 хвилин тиск у камері менший за $5\cdot 10^{-5}$ торр.

Залежно від конкретного призначення (зварюваний матеріал, його товщина) установки, що розглядаються, укомплектовуються новіт-



Рис. 1. Малогабаритна електронно-променева зварювальна установка



Рис. 2. Середньогабаритна електронно-променева зварювальна установка

німи високовольтними інверторними зварювальними джерелами живлення потужністю $15, 30$ і 60 кВт (працюють за фіксованої прискорювальної напруги 60 кВ). Зварювальне джерело розроблено так, що фактично є окремим самодостатнім апаратним комплексом, вся взаємодія з яким здійснюється через промисловий інтерфейс (шина CAN).

Установки комплектуються нерозривно інтегрованою у зварювальне джерело системою вторинно-емісійної електронної візуалізації «РАСТР». На основі генерованого системою



Рис. 3. Великогабаритна електронно-променева зварювальна установка

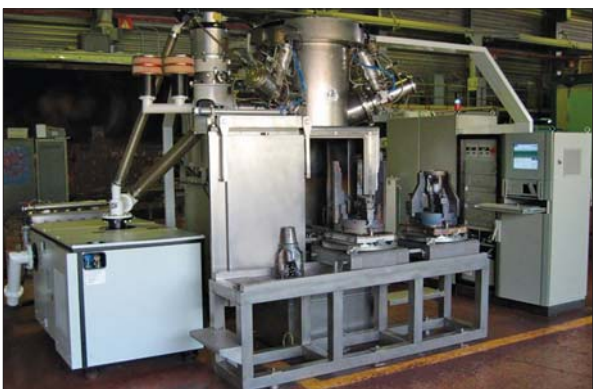


Рис. 4. Установка для зварювання бурових доліт

«РАСТР» модуляційного сигналу зварювальне джерело короткочасно формує на поверхні деталі, що зварюється, електронний растр. У місцях бомбардування поверхні деталі первинними електронами пучка емітуються вторинні електрони, які вловлюються спеціальним пасивним датчиком, розташованим у торці зварювальної гармати. Датчик може мати різне конструктивне виконання, що залежить від сфери застосування, тобто він може бути адаптований під конкретну конфігурацію деталей, що зварюються. Безпосередньо поблизу цього датчика розташовано компактний блок попереднього підсилювача, який формує та посилює корисний сигнал. У результаті сигнал оцифровується і видається на інтерфейс опе-

ратора у вигляді зображення. Система формує досить стійке зображення зони зварювання перед початком зварювання, після його завершення і безпосередньо під час виконання самого зварювання.

Великогабаритні установки (рис. 3) мають об'єм зварювальної камери до 100 м³. За призначенням подібні установки в принципі не відрізняються від середньогабаритних і можуть розглядатися як універсальні, але вони розраховані, відповідно, на вузли значно більших габаритів. При цьому діапазон товщин, що зварюються, як і для середньогабаритних, перебуває в межах можливостей зварювальних енергоблоків потужністю 15, 30 або 60 кВт (60 кВ).

Установки комплектуються нерозривно інтегрованою у зварювальне джерело системою вторинно-емісійної електронної візуалізації «РАСТР». Типовий робочий тиск у камері — $2 \cdot 10^{-4}$ торр. При цьому час повного відкачування зазвичай не перевищує 45 хвилин, а в разі відповідної комплектації вакуумної системи може бути зменшений до 20 хвилин за робочого тиску в камері не вище ніж $8 \cdot 10^{-5}$ торр.

Такі установки мають прецизійний ЧПУ-механізм переміщення внутрішньокамерної зварювальної гармати з тими самими, що й у середньогабаритних установках, ступенями свободи.

Обидва типи установок сконструйовано з урахуванням проведених досліджень поведінки розплавленого металу в парогозових каналах великої глибини. Виконані дослідження спектра власних коливань розплавленого металу в парогозових каналах великої глибини показали, що перша гармоніка цих коливань має визначальний вплив на стабільність парогозового каналу і зумовлює утворення дефектів у вигляді різних несучільностей у середній та кореневій частинах зварних швів.

Було отримано дисперсійне рівняння для власних коливань розплавленого металу в парогозових каналах при процесі ЕПЗ, що встановився:

$$\omega_m^2 = \frac{\sigma}{\rho} \frac{k}{R^2} [(k^2 R^2 + m^2) - 1] \cdot C_m,$$

де m — мода власних коливань розплаву; ω_m — частота m -ї моди; C_m — коефіцієнт m -ї моди; k — хвильовий вектор.

Аналіз цього рівняння показує, що нульова мода коливань m_0 розплаву в каналі відповідає перетяжкам каналу по його висоті, що спричиняє утворення дефектів у шві. Водночас перша мода коливань m_1 відповідає зсувним деформаціям розплавленого металу в каналі і не призводить до порушення формування шва.

Як можна зменшити амплітуду низькочастотних коливань розплавленого металу в каналі? Це можна зробити, наприклад, шляхом нахилу площини стику та електронного пучка на кут 10 – 12° до горизонту. За такої просторової переорієнтації зварювальної ванни в полі сили тяжіння відбувається зміння характеру власних коливань розплаву, перетворення їх із суто капілярних хвиль, характерних для вертикального каналу, на капілярно-гравітаційні хвилі. Подібна трансформація коливань розплаву в похилому парогазовому каналі приводить до суттєвого зростання частот найнижчих гармонік коливань, що зумовлює збільшення коефіцієнта загасання коливань та зменшення амплітуди збурення поверхні розплаву на передній стінці каналу. Як наслідок, підвищується стабільність зварювального процесу загалом.

Стабільність зварювального процесу можна підвищити і в інший спосіб — з використанням комбінованої розгортки з паралельним перенесенням електронного променя вздовж і впоперек напрямку зварювання. При цьому знижується концентрація потужності, що виділяється на стінках парогазового каналу, а також зменшується кількість первинних електронів, які досягають дна каналу. Зрозуміло, що це сприяє підвищенню стабільності парогазового каналу і дає змогу зменшити кількість кореневих дефектів швів великої глибини.

Отже, за результатами проведених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України досліджень створено нове покоління електронно-променевого обладнання, в якому застосовано концепції нахилу пучка і стику, розгортки з паралельним перенесенням пуч-



Рис. 5. Установка для електронно-променевого зварювання слябів



Рис. 6. Спеціалізована електронно-променева зварювальна установка для гранульної металургії

ка, а також нові електронно-оптичні системи електронних гармат.

Спеціалізовані електронно-променеві зварювальні установки ми зазвичай розробляємо під виробництво конкретних виробів, зокрема бурових доліт, товстостінних слябів, контейнерів з гранулами тощо.

Наприклад, ми виготовляємо установки для зварювання бурових доліт, призначених для використання в нафто- та газовидобувній галузі (рис. 4). Застосування трьох гармат, що працюють одночасно, забезпечує зварювання трьох площин з'єднання лап бурових доліт з мінімальними деформаціями корпусу долота.

Інші установки, призначені для електронно-променевого зварювання слябів (рис. 5), застосовують у металургії для виробництва



Рис. 7. Обладнання для електронно-променевого спікання тврдосплавних заготовок: 1 – електронно-променева гармата; 2 – вакуумна камера; 3 – двері; 4 – вакуумна система; 5 – шафа керування; 6 – силова шафа; 7 – шафа джерела живлення; 8 – завантажувальний пристрій



Рис. 8. Обладнання для пошарового виготовлення об'ємних виробів складної форми методом електронно-променевого друку

великогабаритних товстолистових заготовок спеціального призначення. Вони дозволяють зварювати два або три оброблені листи сталі з габаритними розмірами $2 \times 4 \times 0,2$ м в одну заготовку масою 75 т. Після електронного променевого зварювання заготовки надходять на нагрівання та гарячу прокатку до набуття ними необхідних у промисловості розмірів.

Великий попит мають наші установки для дегазації, заповнення та вібраційного ущіль-

нення гранул у капсулах з герметизацією капсул електронно-променевим зварюванням (рис. 6).

У вакуумній камері установки капсулу спочатку нагрівають до $700\text{ }^\circ\text{C}$ для видалення з її поверхні адсорбованих газів та вологи, потім її заповнюють порошковим матеріалом, здійснюючи паралельно віброущільнення гранул, і закривають горловину капсули пробкою з подальшою герметизацією за допомогою зварювання. Після охолодження заповнених та герметизованих у вакуумі капсул вони надходять у машину ізостатичного пресування, в якій, власне, і виготовляють деталі, скажімо, для компонентів газотурбінних двигунів.

Відносно новим напрямом розробок Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України є створення високопродуктивних установок для електронно-променевого спікання заготовок із порошкових матеріалів на основі карбідів вольфраму та кобальту, які отримують у процесі перероблення виробничих відходів, різального інструменту, штампів, прес-форм, фільтер. Ці роботи проводяться спільно з компанією ПрАТ «ПлазмаТек» (м. Вінниця) (рис. 7). У завантажувальній пристрій установки поміщають сформовані циліндричні заготовки, розділені між собою графітовими вставками для запобігання їхньому спіканню. Далі заготовки по черзі потрапляють під скануючий електронний промінь, відбувається їх нагрівання, оплавлення та усадка (усідає до 30 % початкового об'єму заготовки). При цьому висока точність виготовлення значно скорочує витрати на фінальній стадії обробки виробу.

Застосування цієї технології забезпечує високі швидкості нагрівання виробів і підвищені швидкості їх охолодження після вимкнення електронного променя, що приводить до сповільнення процесу зростання зерен перекристалізації рідкої фази, зменшення мінімального розміру зерна і, відповідно, до поліпшення експлуатаційних характеристик готових виробів. У результаті деталі, виготовлені методом електронно-променевого спікання, за своїми характеристиками не поступаються найкращим

Рис. 9. Застосування технології електронно-променевого зварювання в авіабудуванні



зарубіжним зразкам, але мають значно меншу собівартість виготовлення.

Інноваційні технології пошарового виготовлення виробів методом швидкого друку відкривають нові можливості для виробництва деталей заданої форми. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України створено обладнання для пошарового виготовлення об'ємних виробів складної форми методом електронного променевого друку із застосуванням металевих порошкових матеріалів з гранулами сферичної та довільної форми (рис. 8).

Принцип цієї технології полягає в тому, що порошок з бункерів за допомогою механізму розподілу рівномірно розкладають на робочому столі, де він поетапно прогрівається аж до його плавлення. Далі наносять наступний шар порошку, і процес повторюється до отримання готового виробу заданої форми. Створені нами установки призначені для виготовлення виробів промислового та медичного застосування.

На сьогодні електронний промінь успішно працює при виготовленні направляючого апарату авіаційних турбін різної потужності, ремонті лопаток вентиляторного тракту турбін, виготовленні балок центроплану і крила літаків, а також при зварюванні камер згоряння (рис. 9).

Розроблено також технологію ремонту частин авіаційних двигунів: камер згоряння, гідроциліндрів високого тиску, направляючого апарату статора компресора високого тиску газотурбінних двигунів.

Отже, в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України отримано низку важливих науково-практичних результатів:

- створено нове покоління високопродуктивного електронно-променевого обладнання для зварювання та наплавлення, яке є конкурентоспроможним на світовому ринку;
- розроблено обладнання для спікання і локальної термічної обробки електронним пучком циліндричних заготовок з порошкових матеріалів на основі карбідів вольфраму;
- вперше в Україні створено обладнання для адитивного електронно-променевого виробництва із застосуванням металевих порошкових матеріалів і присадних дротів для використання на підприємствах авіакосмічної промисловості та для потреб медицини;
- розроблено технологію й обладнання для ремонту компонентів авіаційних двигунів.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Vladimir M. Nesterenkov

Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>

ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES AND THEIR APPLICATION IN ENERGY,
ROCKET AND AIRCRAFT CONSTRUCTION, MEDICINE

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, November 29, 2023

The report presents the most significant results of fundamental and applied research conducted at the Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine on the creation of electron beam technologies and equipment for their implementation in various industries of Ukraine.

Cite this article: Nesterenkov V.M. Electron beam technologies and their application in energy, rocket and aircraft construction, medicine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (1): 76–82. <https://doi.org/10.15407/visn2024.01.076>