

ЕВОЛЮЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ У КОСМОСІ

С.О. Глушак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: electriber@ukr.net

У статті розглянуто застосування зварювання та проведення ремонтно-відновлювальних робіт в умовах космосу, а також еволюцію конструкції електронно-променевого інструменту протягом кількох десятиліть. Наведено технічні характеристики та технологічні можливості обладнання всіх поколінь і вимоги до нього на різних етапах експлуатації. Обґрунтовано, чому саме електронно-променеве зварювання більш придатне для використання в умовах зниженої гравітації. Наведено технічні характеристики автоматичної установки «Вулкан», на якій вперше в космічних умовах було проведено експерименти зі зварювання. Наведено технічні характеристики універсального ручного інструменту (УРІ) та описано його можливості при виконанні операцій зі зварювання та інших споріднених технологій: різання, паяння, нанесення покриттів і, за потреби, термічної обробки. Показано зразки, які отримано в процесі проведення першого в світі експерименту у відкритому космосі, де за допомогою УРІ космонавти-зварники виконали технологічні операції із зварювання, різання, паяння та нанесення покриттів. Доведено, що узагальнення результатів дослідження та урахування досвіду експлуатації всіх попередніх зразків обладнання дозволило створити наступний інструмент «Універсал», який пройшов комплексні випробування в NASA, у тому числі в літаючій лабораторії КС-135 і в барокамері. У статті представлено електронно-променевий інструмент нового покоління, який розроблено і виготовляється в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона. Бібліогр. 12, рис. 8.

Ключові слова: космос, обладнання, електронно-променеве зварювання, джерело живлення, автоматичне та ручне зварювання

Вступ. Виконання зварювальних робіт та споріднених процесів у відкритому космосі, які в першу чергу пов'язані з розплавленням металів, несуть в собі ризик та небезпеку [1]. Разом з тим, результати перших експериментів зі зварювання в космічних умовах показали, які критерії необхідно застосовувати для оцінки того чи іншого способу зварювання. Дослідження, проведені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона починаючи з 1964 р. показують, що ефективність існуючих способів зварювання в умовах космосу підлягає оцінюванню за допомогою додаткових критеріїв, порівняно з обладнанням, яке експлуатується в наземних умовах. Одними із основних критеріїв є матеріал, яким будуть з'єднуватися ті чи інші конструкції в космічному середовищі, та умови його експлуатації. Також суттєвою вимогою щодо обладнання для зварювання у космосі є його висока надійність, простота та універсальність. Крім того, обладнання повинне відповідати ще таким критеріям, які прийняті для космічної техніки – мати низьку енергоємність, мінімальну масу та об'єм апаратури, бути безпечним та ефективним [2].

У попередніх роботах [1, 3] доведено, що найперспективнішими для майбутнього використання в умовах космосу є променеві способи зварювання, перш за все електронно-променеві, які є ефективнішими та мають ряд вагомих переваг.

Висока концентрація енергії, властива електронно-променевому зварюванню, є особливо необхід-

ною для виконання робіт у космосі, оскільки забезпечує мінімальне тепловкладення в метал, що зварюється, і мінімальну потужність усієї установки. З іншого боку, таку установку можна використовувати й для різання, паяння, нанесення покриттів, тобто вона має дуже важливий для космосу універсалізм.

Дослідження показують, що для виконання робіт зі зварювання та різання в космосі достатньою є потужність 1...3 кВт при прискорюючій напрузі 10...20 кВ. Така установка може жити від бортової мережі космічного корабля або працювати в автономному режимі від акумуляторних батарей [3].

Крім того, технологічне обладнання, що застосовується в космосі, повинно мати мінімальні габарити та вагу, динамічну міцність, надійність, працездатність у вакуумі та при різких змінах температури від -120 до $+120$ °C [3].

Експеримент «Вулкан». Завдяки багаторічним дослідженням в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було створено та випробувано в 1969 р. на космічному кораблі «Союз-6» першу автоматизовану установку «Вулкан» [1, 3]. Вона передбачала випробування в космосі наступних способів зварювання: електричною дугою низького тиску з плавким електродом, плазмовою дугою низького тиску, порожнім катодом та електронним променем.

Установка «Вулкан» (рис. 1) складається з двох ємностей: негерметичної та герметичної. У першій розміщуються пристрої для виконання кожного способу зварювання та обертальний стіл, на якому

розташовуються зварювальні зразки. Під час роботи в цій ємності підтримується низький тиск.

У другій ємності встановлено джерела живлення: автономне акумуляторне, вторинне джерело живлення (ВДЖ), блоки керування та телеметричні засоби вимірювання. Керування установкою здійснюється за допомогою дистанційного пульта [1].

Вага «Вулкана» складає близько 50 кг. Тривалість неперервної роботи була обмежена ємністю акумуляторної батареї.

Технічні характеристики електронно-променевого обладнання «Вулкан» [3]:

- енергія електронів 10 кеВ;
- потужність пучка 0,6 кВт;
- питома потужність променя 1 кВт/мм² на відстані 40 мм від зрізу гармати;
- катод прямонакальний танталовий;
- діодний прожектор;
- вага гармати 450 г;
- вага високовольтного блоку живлення з гарматою 6,5 кг.

Для виконання електронно-променевого зварювання в установці «Вулкан» було обрано прискорюючу напругу 10 кВ. Застосовано діодну електронно-променеву гармату з прямонакальним нагрівом катоду потужністю 0,6 кВт і робочим струмом променя до 60 мА.

Під час проведення експериментів «Вулкан» було розміщено в шлюзовому відсіку космічного корабля «Союз-6», який був розгерметизований. У ньому підтримувався тиск $<1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Екіпаж з дистанційним пультом керування під час проведення експериментів знаходився в герметичному відсіку корабля, який був відділений закритим люком від шлюзового [1].

При виконанні експериментів було проведено дослідження з вивчення зварюваності алюмінієвих сплавів при швидкості зварювання 28...36 м/год. Отримані в результаті експериментів з'єднання зі сплаву АМгб мали пористість на-

багато більшу в порівнянні з тими, що були отримані в наземних умовах.

Результатом проведених експериментів, виконаних електронно-променевим зварюванням, є стикові з'єднання з відбортовкою та без відбортовки країв, а також з'єднання внапуск. Використовувались наступні зварювальні матеріали: нержавіюча сталь 08Х18Н10Т, технічний титан ВТ1-0 та алюмінієві сплави АМгб і Д20 завтовшки 1,5...2,0 мм. Разом з тим виконувалось різання алюмінієвих і титанових сплавів, а також сталі 08Х18Н10Т завтовшки 1,0 мм [1].

У результаті виконаних робіт зі зварювання було встановлено, що при довготривалій мікрогравітації та космічному вакуумі процеси зварювання та різання електронним променем протікають стабільно. Забезпечуються необхідні умови для нормального формування зварних з'єднань та розрізів.

З метою вивчення процесів розплавлення та перенесення металу в умовах зниженої гравітації було виконано зварювання дугою низького тиску плавким дротом. Зварювались стикові з'єднання листів із нержавіючої сталі завтовшки 1 мм на підкладці завтовшки 0,5 мм із того самого матеріалу. Але якісно сформовані зварні шви отримати не вдалося внаслідок нерівномірного обертання зварювального столу зі зразками. У результаті проведення експерименту було виявлено, що процес зварювання дугою низького тиску плавким дротом у космосі при високій швидкості відкачування протікає стабільно. Після ретельного дослідження отриманих зварних зразків було зроблено висновки, що у космічних, як і в наземних умовах, забезпечується формування контрагованої дуги низького тиску в парах зварюваного металу. Незважаючи на окремі недоліки, експерименти на установці «Вулкан» дали змогу отримати унікальну практичну інформацію, яку було враховано при створенні нових зразків космічного обладнання для зварювання в космосі.

Експерименти в космосі зі зварювання та споріднених технологічних процесів ручним електронно-променевим інструментом УРІ. Обладнання, яке описано вище, має дистанційне або автоматичне програмне керування. Однак при роботі у відкритому космосі можливою є велика кількість операцій (у першу чергу ремонтно-відновлюваних робіт або фіксація фрагментів великогабаритних конструкцій), до яких попередньо підготуватися складно або неможливо. Крім того, вірогідним є виникнення надзвичайних ситуацій, які потребують термінових технологічних операцій різання, зварювання або паяння, при яких процес і об'єм операції будуть визначатися космонавтом безпосередньо на місці виконання необхідних робіт [3].

Проведені технологічні експерименти на установці «Вулкан» дозволили розробити та вигото-

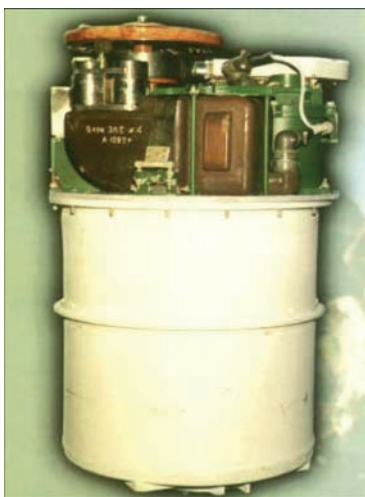


Рис. 1. Автоматизована зварювальна установка «Вулкан»

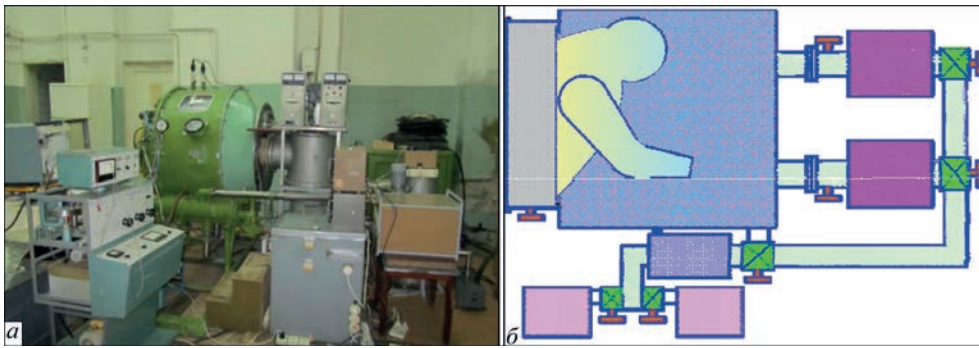


Рис. 2. Обладнання для проведення наземного експерименту з ручного електронно-променевого зварювання та різання: а – випробувальний стенд ОБ.1469; б – оператор, одягнений в скафандр, знаходиться по пояс у глибокому вакуумі

вити дослідний зразок першого ручного електронно-променевого інструменту [3].

Експерименти з дослідним зразком для ручного електронно-променевого зварювання в умовах земної гравітації були проведені спеціалістами ІЕЗ ім. Є.О. Патона у 1974 р. у барокамері з використанням випробувального стенду ОБ.1469 (рис. 2, а).

Перед виконанням експериментів у відкритому космосі першим дослідним зразком ручного електронно-променевого інструменту було проведено численні дослідження в барокамері та в літаючій лабораторії в умовах мікрогравітації та низьких температур.

Під час виконання експерименту в камері стенду ОБ.1469 створювався вакуум, необхідний для роботи електронного променя ($10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па). Для цих експериментів було створено діодну електронно-променеву гармату, номінальна потужність якої складала 1,5 кВт з прискорюючою напругою до 15 кВ. Оператор, який виконував електронно-променеве зварювання, був одягнений у фрагмент скафандру і знаходився по пояс у глибокому вакуумі (рис. 2, б).

За результатами проведених експериментів було створено льотний зразок універсального ручного електронно-променевого інструменту УРІ (рис. 3). Ураховуючи недоліки, які було виявлено

при випробуванні першого дослідного зразка, в УРІ прискорюючу напругу було знижено до 5 кВ, що дозволило уникнути жорсткого рентгенівського випромінювання. Така прискорююча напруга і потужність 0,35 кВт дозволяють виконувати технологічні процеси зварювання, різання, паяння зразків завтовшки 1,0...1,5 мм., а також нанесення покриттів у відкритому космосі.

Усі технологічні процеси інструментом УРІ виконуються електронно-променевим способом, який є найприйнятнішим, технологічнішим і універсальнішим для виконання цих робіт. Вакуумне середовище на навколоземній орбіті є природним і зручним для здійснення цього способу зварювання. При цьому ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) процесу електронно-променевого зварювання становить 85...90 %. Це дозволяє забезпечити надійну якість зварних з'єднань, а також необхідну герметичність.

Інструмент УРІ являє собою моноблок, базовим елементом якого є коробчастий корпус зі спеціальною рукояткою, яка виготовлена з урахуванням антропометрії перчатки скафандра. На передній стінці корпусу встановлено дві малогабаритні електронно-променеві гармати, кожна з яких може формувати електронний промінь і виконувати процеси зварювання, різання, паяння, а також бомбардувати тигель, виконуючи процес нанесення покриттів.

Для зручності при транспортуванні всі функціональні вузли, що входять в УРІ, було скомпоновано в єдиному решітчастому контейнері:

- герметичний приладовий відсік, у якому розміщені вторинне джерело живлення, система телеметрії та блок автоматики;
- пульт керування;
- кабельні комунікації.

На протилежному боці контейнера можуть бути зафіксовані спеціальні змінні касети для виконання всіх запланованих технологічних операцій, на яких було встановлено по шість зразків з титану ВТ1 і нержавіючої сталі 12Х18Н10Т зі зразками матеріалів для обробки та з'єднання.

Технічні характеристики УРІ [6]:

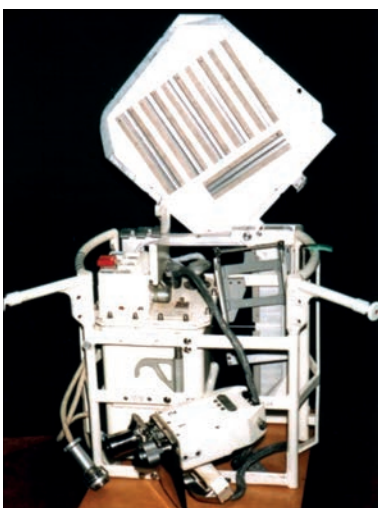


Рис. 3. Ручний електронно-променевий інструмент УРІ

- напруга живлення 23...34 В;
- потужність до 350 Вт;
- прискорююча напруга 5 кВ;
- струм електронного пучка до 70 мА;
- тип катоду прямонакальний танталовий 2×2 мм, $\delta = 0,06$ мм;
- вага УРІ без касети 30 кг;
- повна вага касети 10 кг;
- вага власне інструменту 3,5 кг.

25 червня 1984 р. вперше в світі у відкритому космосі на борту орбітальної станції «Салют-7» за допомогою зварювального інструменту УРІ відбувся експеримент з виконання технологічних процесів різання, зварювання, паяння та нанесення покриттів.

Для різання були підготовлені зразки із нержавіючої сталі та титанового сплаву завтовшки 0,5 мм. Зварювання і паяння відбувалось на зразках із тих самих матеріалів завтовшки 1 мм. Срібні покриття наносились на зачорнені алюмінієві пластини завтовшки 2 мм і загальною площею 0,06 м² [1].

Першим виконувалось різання титанової пластини, як найменш складна операція. Потім було проведено операції зварювання, паяння та нанесення покриттів. Перші зразки, які були одержані у відкритому космосі ручним електронно-променевим інструментом, показано на (рис. 4). Результати експериментів були достатньо інформативними. По-перше, було показано саму можливість виконання у відкритому космосі за допомогою зварювального інструменту операцій зварювання та споріднених технологічних процесів, по-друге, що оператор, вдягнений у скафандр, може безпечно виконувати ці технологічні операції та отримувати якісні результати.

Після аналізу результатів досліджень було розроблено рекомендації щодо вдосконалення методики наземної підготовки космонавтів-операторів. Повторні експерименти було проведено в 1986 р., які виконувалися знову у відкритому космосі та проходили значно складніше. Космонавтами проведено зварювання та паяння у відкритому космосі окремих вузлів фермових конструкцій, які розміщува-

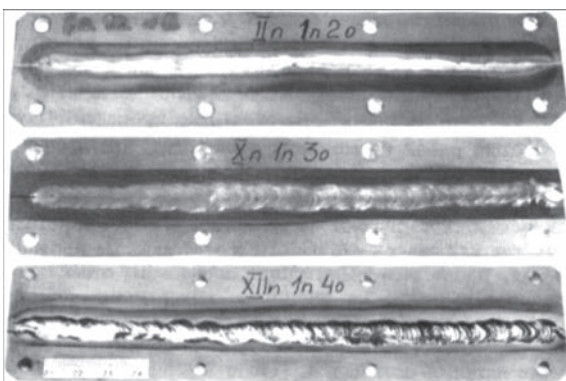


Рис. 4. Зразки стикових з'єднань, виготовлених у космосі на обладнанні УРІ

лися у спеціальних касетах-маніпуляторах (рис. 5). Після завершення робіт з розкриття та складання шарнірно-важільних ферм космонавти провели зварювання окремих її вузлів. Усього було зварено десять окремих шарнірних вузлів з титанового сплаву ВТ-4. Після цього було виконано комплексну операцію зварювання-паяння вузлів трубчато-тросової ферми. Кожен вузол являв собою фрагмент незамкненої труби зі сталі 36НХТЮ, на яку було насаджено заповнене припоєм кільце зі сталі Ст 30.

Узагальнення результатів експериментів та аналіз накопиченого досвіду дозволили сформулювати основні принципи виконання зварювальних робіт у космосі, підтвердили необхідність модифікації інструменту, впровадження нових технічних рішень з урахуванням деяких істотних коригувань технологічних параметрів.

Перед розробниками стояли такі основні завдання:

- довести вихідну потужність до 1 кВт для роботи з алюмінієм і його сплавами;
- оснастити інструмент механізмом подачі дроту;
- ввести до складу зварювальної апаратури систему оперативної інформації та контролю технологічних і технічних параметрів з метою передачі її на записуючі пристрої станції.

Комплекс електронно-променевого інструменту «Універсал» для виконання зварювання та споріднених технологій у відкритому космосі. Узагальнення накопиченого досвіду дозволило розробити універсальний комплект електронно-променевого інструменту «Універсал», призначений для експлуатації у складі перспек-

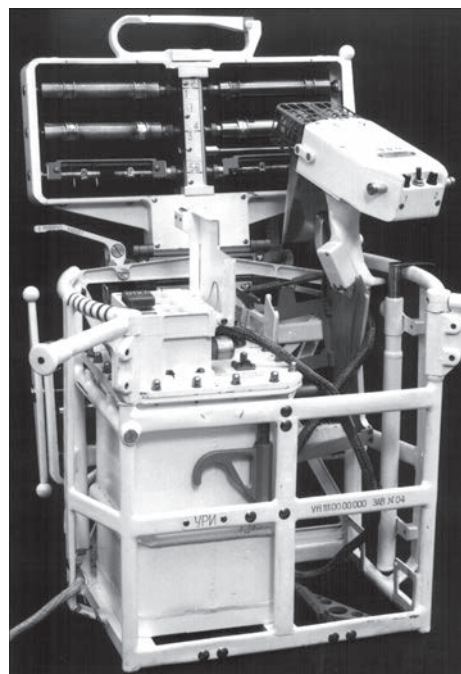


Рис. 5. УРІ та касета-маніпулятор із встановленими зразками вузлів фермових конструкцій

тивних великогабаритних довгострокових космічних орбітальних станцій.

Порівняно з попереднім обладнанням УРІ в «Універсал» були внесені такі зміни:

- значно (у 2,0...2,5 рази) збільшено вихідну потужність апаратури;
- власне інструмент виконаний функціонально цільовим, одногарматним, з катодним резервуванням, що дозволяє переходити від однієї технологічної операції до іншої простою заміною необхідного блоку або оснащення;
- «Універсал» укомплектовано базовим інструментом для зварювання, паяння і різання, механізмом подачі присадного матеріалу для зварювання та паяння, інструментом з турельною насадкою, яка має чотири тиглі з матеріалами, що випаровуються, для нанесення спеціальних покриттів.

Під час розробки цього комплексу було успішно вирішено завдання уніфікації основних функціонально важливих вузлів. При цьому було досягнуто максимально можливе корисне використання бортового живлення при мінімальних масогабаритних характеристиках апаратури «Універсал» (рис. 6). Комплект обладнання складався з окремих блоків, які можуть, при необхідності, компонуватися в спеціалізовані установки різного призначення та необхідної потужності. Для електроживлення такої установки в комплексі передбачено відповідні високовольтні блоки та вторинне джерело електроживлення з примусовим тепловідведенням [3].

Базовий інструмент може самостійно виконувати зварювання, паяння та різання, а також за допомогою малогабаритного механізму подачі присадного дроту виконувати зварювання і паяння з присадним матеріалом. Інструмент має спеціальний механізм, призначений для нанесення покриттів термічним випаровування металів, а також барабанну насадку з чотирма тиглями, що дозволяє наносити покриття з різних матеріалів. Цей інструмент може також використовуватися для нагріву поверхні, що обробляється, розфокусованим електронним променем.



Рис. 6. Апаратура «Універсал»

Якщо для проведення монтажних-складальних і ремонтних робіт існує необхідність у застосуванні роботів або маніпуляторів, то може бути скомплектовано автоматичну зварювальну установку, у склад якої буде входити один або декілька (до чотирьох) електронно-променевих інструментів потужністю до 1,1 кВт.

Для проведення ремонтно-відновлювальних або монтажних-складальних робіт у заздалегідь не передбачених випадках може бути скомплектовано набір ручних електронно-променевих інструментів, що дозволяє виконувати зварювальні роботи безпосередньо оператору, спорядженому в космічний скафандр.

При проведенні цих робіт необхідно врахувати те, що потужність апаратури повинна підвищитися, також необхідні додатковий захист скафандру і комплектація робочим місцем космонавта-зварника, яке забезпечує оператору комфортні та безпечні умови роботи (рис. 7). Робоче місце повинно бути оснащено контейнером для зберігання електронно-променевого інструменту та пультом оператора і розміщене на зовнішній поверхні космічного апарату в місці проведення робіт [3].

Технічні характеристики «Універсал»:

- напруга живлення 23...34 В;
- потужність до 1110 Вт;
- прискорююча напруга 8...10 кВ;
- струм електронного пучка до 110 мА;
- тип катоду прямонакальний танталовий 2×2 мм, $\delta = 0,06$ мм.

Після виготовлення обладнання «Універсал» підлягало багатофункціональним комплексним випробуванням. У 1991–1992 рр. було проведено серію випробувань в умовах мікрогравітації у літаючій лабораторії КС-135 (Центр ім. Л. Джонсона, NASA, м. Х'юстон), шість занурень у басейні (у Центрі ім. Дж. Маршалла, NASA, м. Хантсвіл) та п'ять підйомів до 6 км у барокамері.

Було проведено кваліфікаційні передполітні випробування виготовленого обладнання з метою

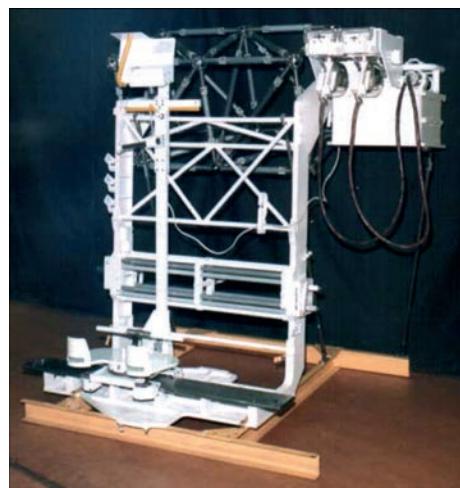


Рис. 7. Робоче місце космонавта-зварника

подальшого його використання у проведенні експерименту на навколоземній орбіті [3]:

- випробування на електромагнітну сумісність із системами корабля;
- оцінка працездатності обладнання при тривалому зберіганні в неробочому стані при температурах $-113...+80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- термоциклічні випробування ($-40...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$) при 8-и циклах випробування;
- випробування на токсичність (на шкідливі виділення від апаратури корабля);
- теплові випробування;
- кількісна оцінка бризкоутворення;
- випробування на вібростійкість;
- заміри рентгенівського випромінювання;
- оціночні випробування на прямий вплив електронного променя на матеріали.

Після проведення всебічних наземних випробувань комплекс «Універсал» було рекомендовано для використання у складі перспективних орбітальних станцій. Але у зв'язку з проблемами на кораблі «Коламбія» польоти на цих кораблях було припинено і програму міжнародного експерименту з інструментом «Універсал» було закрито.

Нове покоління електронно-променевого обладнання для зварювання у відкритому космосі. Результати проведених у відкритому космосі експериментів щодо автоматичного та ручного електронно-променевого зварювання свідчать про те, що апаратура, яку було створено раніше, дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1,5 мм. У той же час товщина матеріалу, який використовується при виготовленні оболонок пілотованих космічних апаратів, досягає 4...6 мм, а

довжина зварювальних швів може сягати декількох метрів [4].

Другим недоліком конструкцій гармат попереднього покоління є те, що термін їх роботи не більше 7 хв з-за відсутності охолодження катодного блоку. Ці фактори не впливали на роботу гармати для ручного інструменту. Але для роботи в автоматичному і довготривалому режимі, при виконанні робіт з 3D-принтіngu ці фактори мають негативний вплив.

У зв'язку з цим необхідно було створити гармату нового покоління, яка б мала технічні характеристики для зварювання більших товщин матеріалів, які використовуються в сучасному аерокосмічному будівництві, а також для виконання довготривалих технологічних процесів 3D-принтіngu [5, 6]. В ІЄЗ ім. Є.О. Патона проведено роботи зі створення малогабаритної електронно-променевої гармати нового покоління з потужністю електронного променя до 2,5 кВт. Теоретичні розрахунки із застосуванням методу траєкторного аналізу та синтезу дозволили розробити електронно-оптичну систему гармати поліпшеної щільності електронного променя [7, 8], що вирішує проблему зварювання матеріалів завтовшки до 6 мм. Для можливості виконання експериментів з 3D-принтіngu розроблено нову фокусуючу та відхиляючу системи.

Було також виключене монолітне поєднання електронно-променевої гармати з високовольтним джерелом живлення, що сприяє покращенню умов роботи оператора-космонавта при спостереженні за процесом зварювання та дає змогу оператору виконувати технологічні процеси за допомогою маніпулятора з 5-ма ступенями свободи. Гармата з'єднується з джерелом живлення (яке розміщу-



Рис. 8. Ручний електронно-променевий інструмент нового покоління та гармата для зварювання і 3D-принтіngu для довготривалої роботи: а – прототип комплексу ручного інструменту, випробуваний при виконанні технологічних експериментів; б – загальний вигляд електронно-променевої гармати для зварювання в космосі в складі маніпулятора або робота; в – спеціальний маніпулятор з 5-ма ступенями свободи, створений для виконання процесу автоматичного зварювання; з – макроструктура алюмінієвого сплаву АМг6 завтовшки 8 мм

ється у вакуумному середовищі) за допомогою високовольтного гнучкого кабеля з високовольтним роз'ємом і має можливість формувати електромагнітною фокуруючою системою гострий електронний промінь діаметром 0,6 мм. Застосовуючи таку конструкцію гармати, можна вирішити проблему зварювання швів великої довжини.

Нова електронно-променева гармата для роботи в космічних умовах має комбіновану систему охолодження катодного блоку [9]. При цьому ресурс роботи гармати – не менше 60 %, а термін роботи – не менше ніж 1 рік, що дуже важливо для виконання процесів 3D-принтингу та при проведенні монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця.

На (рис. 8) показано дослідний зразок електронно-променевої гармати нового покоління для роботи в умовах високого вакууму, перепаду температур та низької гравітації.

У конструкції гармати [10] передбачається також використовувати замість паяних суцільні ізолятори спрощеної конфігурації, які будуть виготовлені з сучасних високоякісних корундових матеріалів, що мають вищі ізоляційні властивості. Таке рішення позбавить проблеми пробоїв, які виникають у місцях паяння [11]. Передбачається також механізм подачі присадного дроту [12].

Висновки

1. За роки роботи зі створення обладнання для зварювання в космосі було розроблено, виготовлено та відпрацьовано при роботі в земних умовах, які імітують космічні, з використанням літаючої лабораторії і в барокамері, цілу низку обладнання для технологічних робіт у космосі.

2. Узагальнення результатів експериментів та аналіз накопиченого досвіду дозволили сформулювати основні принципи розробки, виготовлення та випробування обладнання, а також виконання зварювальних робіт у космосі, які визначили необхідність модифікації обладнання, впровадження нових технічних рішень з урахуванням деяких істотних коригувань технологічних параметрів.

3. Створена раніше апаратура «Вулкан» для автоматичного зварювання і ручний інструмент УРІ, які було розроблено та виготовлено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, було випробувано на космічній орбіті, а також ручний інструмент «Універсал», мають такі недоліки, як невеликий ресурс роботи катода (не більше 1 год.), електростатичне фокусування електронного променя (при робочій відстані 40...50 мм діаметр пучка не менше 2,5 мм).

4. Встановлено з урахуванням досвіду експлуатації попередніх модифікацій обладнання, які операції повинно виконувати обладнання сучасного рівня.

5. У теперішній час ІЕЗ ім. Є.О. Патона провів роботи зі створення малогабаритної електронно-променевої гармати нового покоління потужністю 2...2,5 кВт, що дає можливість зварювати алюмінієві сплави завтовшки до 6 мм.

6. Встановлено, що завдяки новій фокуруючій та відхиляючій системам є можливим виконання експериментів з 3D-принтингу. Сучасна електронно-оптична система гармати дозволяє одержати електронний промінь підвищеної питомої потужності діаметром не більше 1 мм на відстані 50...150 мм.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Лапчинский В.Ф. (1998) *Сварка и родственные технологии в космосе*. Киев, Наукова думка.
2. (1987) *Космонавтика СССР*. Москва, Машиностроение, Планета, сс. 179–195.
3. (2000) *Space: technologies, materials, structures*. Edited by B.E. Paton. E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kiev.
4. Патон Б.Е. (2023) Перспективи застосування зварювання в космосі. *Автоматичне зварювання*, 3, 46–60.
5. Лобанов Л.М., Аснис Ю.А., Терновий Є.Г., Зубченко Ю.В., Перепеченко Б.І., Харківська Т.М., Шулим В.Ф., Статкевич І.І., Глушак С.О. (2020) *Спосіб забезпечення високого робочого вакууму в електронно-променевій гарматі та пристрій для здійснення зварювання і споріднених технологій у відкритому космосі*. Патент на винахід № 121773, 27.07.2020 р., Бюл. № 14.
6. Fragomeni, J.M., Nunes, A.C. Jr. (2003) A study of the effects of welding parameters on electron beam welding in the space environment. *Aerospace Science and Technology*, 7, 5, 373–384. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(03\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(03)00031-2)
7. Бондарев А.А., Терновой Е.Г. (2010) Особенности формирования швов и свойства соединений алюминевых и магниевых сплавов в условиях, имитирующих космические. *Автоматическая сварка*, 11, 7–13.
8. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Аснис Ю.А. та ін. (2017) Обладнання і технологія для електронно-променевого зварювання в космосі. *Космічна наука і технологія*, 23, 4(107), 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.027>
9. Аснис Ю.А., Зубченко Ю.В., Терновий Є.Г. та ін. (2018) *Спосіб формування електронного пучка електронно-променевої гармати для зварювання та споріднених технологій в умовах відкритого космосу*. Патент на винахід № 17397, 25.07.2018 р., Бюл. № 14.
10. Lobanov, L.M., Asnis, E.A., Ternovy, Ye.G. et al. (2020) *Some Issues of Repairing Manned Space Vehicles in Outer Space Using Electron Beam Welding*. State Phenomena Submitted: 2020-07-07 ISSN: 1662-9779, 315, 101–105. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.315.101>
11. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Naidich, Yu. et al. (2019) New electron beam gun for welding in space. *Science and technology of welding and joining*, 24, 4, 320–326. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1534794>
12. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Аснис Ю.А. та ін. (2019) *Пристрій для ручного електронно-променевого зварювання і споріднених технологій у космосі*. Патент України № 118896, 25.03.2019 р., Бюл. № 6.

References

1. Paton, B.E., Lapchinskii, V.F. (1998) *Welding in space and related technologies*. Cambridge International Science Publishing.
2. (1987) *Cosmonautics of USSR*. Mashinostroenie, Planeta, 179–195 [in Russian].
3. (2002) *Space: Technologies, materials, structures*. Ed. by B.E. Paton. London, Taylor & Francis.

4. (2023) Prospects for the application of welding in Space. *Avtomatich Svarka.*, **3**, 46–60.
5. Lobanov, L.M., Asnis, Yu.A., Ternovyi, Ie.G. et al. (2020) *Method of ensuring high operational vacuum in electron beam gun and device for performance of welding and related technologies in open space*. Pat. 121773, Ukraine, Publ. 27.07.2020.
6. Fragomeni, J.M., Nunes, A.C. Jr. (2003) A study of the effects of welding parameters on electron beam welding in the space environment. *Aerospace Sci. and Technol.*, **7**(5), 373–384. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(03\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(03)00031-2)
7. Bondarev, A.A., Ternovoj, E. (2010) Features of weld formation and properties of aluminium and magnesium alloy joints under simulated space conditions. *The Paton Welding J.*, **11**, 16–20.
8. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Asnis, Yu.A. et al. (2017) Equipment and technology for electron beam welding in space. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, **107**(4), 27–32 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.027>
9. Asnis, Yu.A., Zubchenko, Yu.V., Ternovyi, Ie.G. et al. (2018) *Method of electron beam formation in electron beam gun for welding and related technologies under open space conditions*. Pat. 17397, Ukraine, Publ. 25.07.2018.
10. Lobanov, L.M., Asnis, E.A., Ternov, Ye.G. et al. (2020) *Some issues of repairing manned space vehicles in outer space using electron beam welding*. State Phenomena Submitted: 2020-07-07, 315, 101–105. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.315.101>
11. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Naidich, Yu. et al. (2019) New electron beam gun for welding in space. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **24**(4), 320–326. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1534794>
12. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Asnis, Yu.A. et al. (2019) *Device for manual electron beam welding and related technologies in space*. Pat. 118896, Ukraine, Publ. 25.03.2019.

EVOLUTION OF ELECTRON BEAM HARDWARE FOR WELDING IN SPACE

S.O. Hlushak

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

E-mail: electriber@ukr.net

The paper deals with application of welding and conducting repair-restoration operations in space, as well as evolution of the design of electron beam tool over several decades. Technical characteristics and technological capabilities of all the generations of hardware and requirements to it at different operation stages are described. Substantiation is provided for electron beam welding being the most suitable process for application under lower gravity conditions. Specification of “Vulcan” automatic unit is given, in which welding experiments were conducted for the first time in space. Specification of the versatile hand tool (VHT) is provided, and its capabilities are described during performance of operations of welding and other related technological processes, namely cutting, brazing, coating deposition and heat treatment, if required. Samples are shown, which were made when conducting the world’s first experiment in open space, when the cosmonaut-welders used VHT to perform the technological operations of welding, cutting, brazing and coating deposition. It is proved that generalization of investigation results and incorporating the experience of operation of all the previous samples of the hardware allowed development of the next “Universal” tool, which passed comprehensive testing at NASA, including in the KC-135 flying laboratory and in the space simulation test chamber. The paper presents new generation electron beam tool, which was developed and is manufactured at PWI. 12 Ref., 8 Fig.

Keywords: space; hardware, electron beam welding, power source, automatic and manual welding

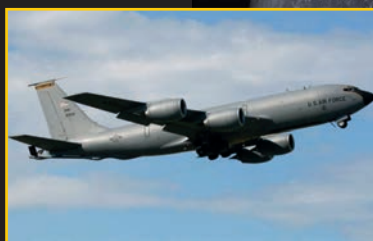
Надійшла до редакції 19.04.2023

STAGES OF THE PATH



Experiment on electronic beam welding and cutting in the open space. «SALUT-7» station, 1984.
The experiment in open space lasted more than 3 hours.

Several series of ground tests of the «Universal» equipment were carried out, including flight tests at the flying laboratory NASA KS-135 in the mode of short-term weightlessness.
George Marshall Space Flight Center, 2000.



American flying
laboratory KS-135

A test stand installed in the
flying laboratory



Paton Welding Institute
<https://paton.org.ua>

