

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.027>

УДК 621.791:629.78

Б. Є. Патон, Л. М. Лобанов, Ю. А. Асніс, Є. Г. Терновий, Ю. В. Зубченко

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, Київ, Україна

ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ В КОСМОСІ

В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона створено нове покоління ручного електронно-променевого інструмента для зварювання і споріднених технологій при виконанні монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт на пілотованих космічних апаратах у відкритому космосі. Передбачено можливість роботи інструмента не тільки в ручному, а й у автоматичному режимі з використанням робототехнічних пристроїв. Розроблена апаратура і технології можуть також застосовуватися при виконанні робіт, пов'язаних з освоєнням Місяця і при польоті на Марс. Проведено роботи з відпрацювання технології зварювання алюмінієвих і титанових сплавів, а також нержавіючих сталей за допомогою ручного електронно-променевого інструмента нового покоління. Одержані результати досліджень зварних з'єднань підтвердили високу дієздатність і надійність створеного обладнання.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, споріднені технології, ручний електронно-променевий інструмент нового покоління, технологія зварювання, алюмінієві та титанові сплави, нержавіючі сталі, дослідження, зварні з'єднання.

Одним із перспективних напрямків робіт, необхідних при експлуатації орбітальних комплексів і створення довготривалих баз на Місяці, є монтаж та ремонт конструкцій і фрагментів металевих елементів, які використовуються для створення різноманітних космічних об'єктів [1, 2, 8]. При цьому з'єднання окремих елементів або ремонт за допомогою зварювання, без сумніву, має переваги в плані одержання гарантованої герметичності порівняно з фланцевими, різьбовими, пресовими чи іншими з'єднаннями.

Проблеми зварювання металевих елементів різноманітного функціонального призначення перш за все є актуальними при проведенні ремонтних робіт на борту пілотованих космічних об'єктів, у першу чергу орбітальних космічних комплексів [6,

9]. Тому оснащення таких об'єктів високонадійним універсальним зварювальним обладнанням дозволить виконати зварювальні та інші роботи, які забезпечать високу дієздатність конструкції протягом всього часу її експлуатації.

Аналіз різних способів зварювання показав, що найбільш ефективним і надійним способом для виконання зварювальних та споріднених технологій (різання, паяння, нанесення покриттів та ін.) у відкритому космосі є електронно-променевий як в ручному, так і в автоматизованому варіантах.

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона займає провідні позиції у світі із розробок та застосування обладнання для зварювальних і споріднених технологічних процесів у космосі. За багато років накопичено значний досвід створення апаратури для зварювання та інших робіт у відкритому космосі. Цей досвід був використаний при створенні ручного електронно-променевого інструмента попереднього і нового покоління для зварювання та



Рис. 1. Ручна електронно-променева гармата першого дослідного зразка

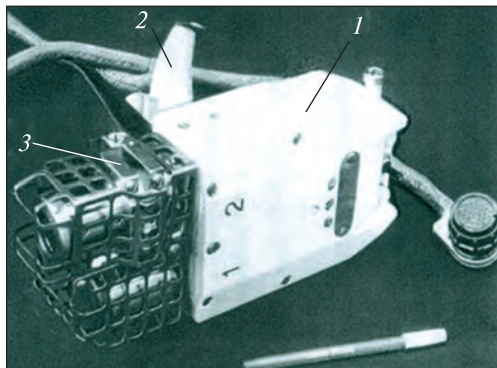


Рис. 2. Льотний зразок ручного електронно-променевого інструмента (УРІ): 1 — високовольтне джерело живлення, 2 — рукоятка, 3 — діодні електронно-променеві гармати



Рис. 3. С. Савицька виконує технологічні експерименти у відкритому космосі

споріднених технологій при проведенні ремонтних і монтажних робіт у відкритому космосі.

Проведений у 1969 р. експеримент із автоматичного зварювання у відкритому космосі на кораблі «Союз-6» сприяв використанню космічного середовища для виконання різних науково-дослідних та технологічних задач [5] і став фундаментом космічної технології. В експерименті на космічному кораблі «Союз-6» на апаратурі «Вулкан» були випробувані декілька способів зварювання, зокрема і електронно-променевої. За допомогою електронно-променевої гармати було отримано електронний промінь, яким виконували технологічні експерименти зі зварювання та різання зразків із титану, алюмінієвих сплавів та нержавіючих сталей в автоматичному режимі [7]. В результаті проведених технологічних експериментів у космосі і наземних досліджень отриманих зразків було встановлено, що найбільш перспективним способом зварювання є електронно-променевий, при якому використовується високий космічний вакуум. Перший технологічний експеримент у космосі довів можливість і перспективність використання автоматичного зварювання для одержання нероз'ємних та герметичних з'єднань металів. Проте є велика кількість монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт, які неможливо виконати за допомогою автоматичного зварювання. Такі роботи повинні виконуватися вручну. Це сприяло вивченню можливостей виконання в космосі ручного зварювання, різання та інших технологічних процесів. Відкритий космос —

це «природний» вакуум — якісне середовище для електронного променя. Електронний промінь є висококонцентрованим джерелом нагріву, що дозволяє працювати з усіма матеріалами, які використовуються у космічному апаратобудуванні. Цей процес не супроводжується бризкоутворенням, що важливо при роботі у скафандрі. Тому було прийнято рішення закласти в основу бортового інструмента для ручного зварювання саме цей процес.

Були розроблені, виготовлені та випробувані в земних умовах кілька дослідних зразків інструмента для ручного електронно-променевого зварювання. На рис. 1 показано один із перших інструментів для ручного електронно-променевого зварювання.

Завдяки всебічним випробуванням дослідних зразків ручного електронно-променевого інструмента були вирішені конструкторсько-технологічні проблеми, та питання техніки безпеки при виконанні технологічних робіт. Це дозволило створити перший зразок бортового ручного електронно-променевого інструмента (УРІ), який був виготовлений і випробуваний в наземних умовах (рис. 2).

Конструктивно він значно відрізнявся від першого макетного зразка ручного електронно-променевого інструмента. В ньому були використані дві діодні пряморозжарювальні електронно-променеві гармати, які були злиті з високовольтним джерелом живлення, до якого також була приєднана рукоятка з низьковольтним кабелем від вторинного джерела живлення (інвертора) і системи керування.

В 1984 р. у відкритому космосі були проведені експерименти із відпрацювання технологій зварювання, різання, паяння та нанесення покриттів за допомогою ручного електронно-променевого інструмента. Експеримент тривав майже чотири години. Його виконували космонавти-оператори С. Савицька та В. Джанібеков за бортом орбітальної станції «Салют-7» (рис. 3) [2, 6].

Виконані технологічні експерименти за допомогою ручного електронно-променевого інструмента підтвердили необхідність такого інструмента для робіт у відкритому космосі. Але цей інструмент вимагав доробок і модифікації. Він мав малу потужність (0.6 кВт), великі габарити та масу (до 5.5 кг), а також малу робочу відстань (40 мм) від електронно-променевої гармати до зразків, що обробляються. Все це завдавало незручностей у роботі, не дозволяло зварювати матеріал товщиною понад 0.5 мм.

Після детального аналізу даних, отриманих в експерименті, було створено наступне покоління зварювального інструмента — апаратура «Універсал» (рис. 4).

До апаратури «Універсал» були внесені суттєві зміни порівняно з УРІ:

- удвічі збільшено вихідну потужність апаратури,
- сам інструмент виконано функціонально цільовим, одногарматним, з катодним резервуванням, що дозволяло переходити від однієї операції до іншої (УРІ мав дві гармати для різних технологічних функцій),



Рис. 4. Загальний вигляд ручного електронно-променевого інструмента «Універсал»



Рис. 5. Ручний електронно-променевий інструмент нового покоління

• «Універсал» мав оснащений базовий інструмент для зварювання, паяння та різання; а також інструмент з турельною насадкою і вміщеними в ній чотирма тиглями з матеріалами для випаровування при нанесенні покриттів.

Після наземного випробування він був запущений у виробництво як льотний комплект апаратури, з яким передбачалося здійснити новий космічний експеримент [3, 4]. Планувалося провести космічні експерименти на борту одного з кораблів серії «Шаттл», а також на орбітальній станції «Мир». В обох випадках були проведені всебічні кваліфікаційні випробування, і апаратура була повністю підготовлена для роботи на цих об'єктах. Однак у зв'язку з рядом обставин ці експерименти не були проведені.

Аналіз результатів наземних технологічних експериментів, проведених з апаратурою «Універсал», показав, що з його допомогою можна зварювати алюмінієві і титанові сплави, а також нержавіючу сталь товщиною до 1.5 мм, тоді як товщина матеріалів, які використовуються при виготовленні пілотованих КА, може бути до 6 мм.

В даний час в ІЕЗ ім. Є. О. Патона виконуються роботи зі створення нового покоління електронно-променевого інструмента для зварювання у відкритому космосі.

На рис. 5 показано ручний електронно-променевий інструмент нового покоління, що включає в себе тріодну електронно-променеву гармату, яка відокремлена від високовольтного джерела живлення. Конструктивне відокремлення електронно-променевої гармати від високовольтного джерела живлення та використання для живлення гармати гнучкого високовольтного кабеля з малогабаритним високовольтним роз'ємом дає можливість суттєво зменшити габарити і масу інструмента та підвищити його маневре-

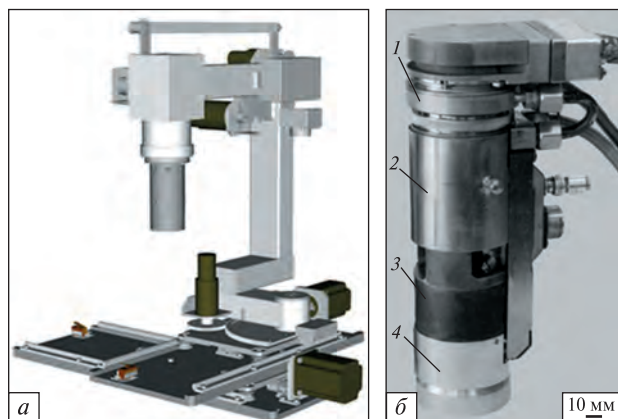


Рис. 6. Обладнання для автоматичного електронно-променевого зварювання в космосі: а — маніпулятор для переміщення електронно-променевої гармати, б — триодна електронно-променева гармата нового покоління: 1 — катодна частина, 2 — анодна частина, 3 — фокусувальна система, 4 — відхилювальна система

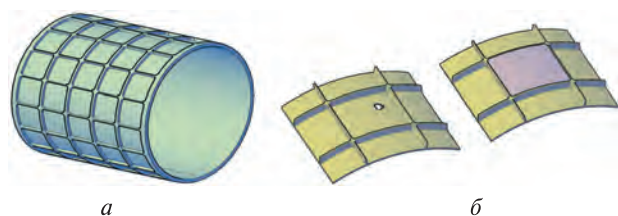


Рис. 7. Ремонт фрагментів корпусу космічних апаратів з використанням обладнання і технології електронно-променевого зварювання: а — корпусна оболонка, б — герметизація пошкодженої комірки корпусу накладкою за допомогою автоматичного електронно-променевого зварювання

ність при здійсненні технологічних процесів у відкритому космосі; підвищити термін безперервної роботи та експлуатаційну надійність інструмента в цілому завдяки тому, що високовольтне джерело живлення розміщують в автономному герметичному контейнері, а також полегшити операції зміни інструментів різного технологічного призначення безпосередньо за бортом космічного об'єкта. В новому поколінні електронно-променевого інструмента значно підвищена потужність до 2.5 кВт, а також є можливість отримати гостросфокусований промінь діаметром не більше 0.6 мм при відстані 70...85 мм від зварювальної поверхні. Маса гармати з рукояткою і гардою складає приблизно 3 кг, що майже удвічі менше, ніж маса «Універсалу». Ресурс роботи катода складає 30...40 год. Заміну спра-

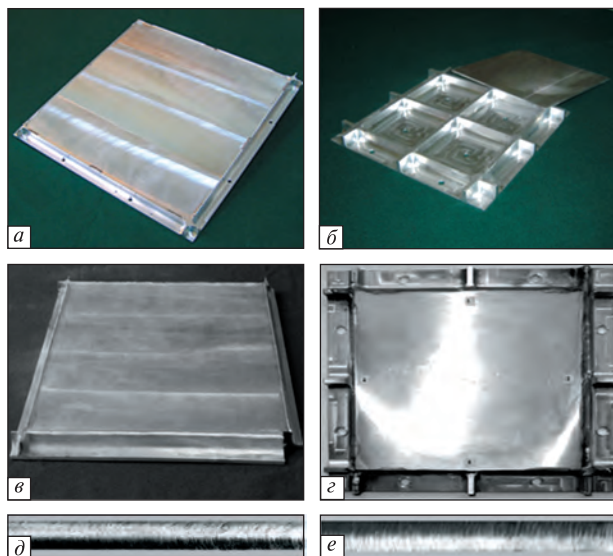


Рис. 8. Відпрацювання технології ремонту чарунок панелей способом приварювання накладок електронним променем: а — фрагмент панелі з накладкою на комірку (алюмінієвий сплав 2219), б — фрагмент панелі з накладкою на комірки (алюмінієвий сплав 5456), в, г — панелі після приварення накладок, д — фрагмент шва на панелі із сплаву 2219, е — фрагмент шва на панелі зі сплаву 5456

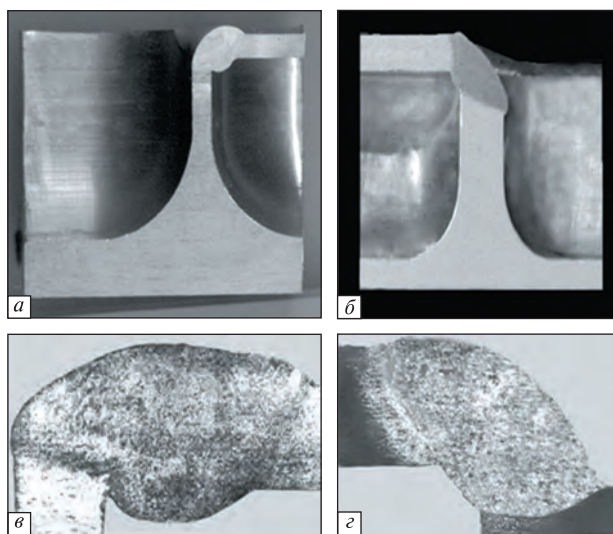


Рис. 9. Макро- та мікроструктури отриманих з'єднань при різних збільшеннях

цьованого катодного вузла можна буде виконати на орбіті протягом 5...10 хв. Передбачено також можливість роботи інструмента не тільки в ручному, але і в автоматичному режимі з викорис-

танням робототехнічних пристроїв або маніпуляторів (рис. 6).

Апаратура для автоматичного електронно-променевого зварювання відрізняється від ручного інструмента тим, що до складу анодної частини гармати входить фокусувальна і відхилювальна системи. Фокусувальна система дозволяє керувати електронним променем з метою одержання гостросфокусованого або розфокусованого променя, в залежності від виду технологічного процесу. При цьому робоча відстань від поверхні зварюваного об'єкта збільшується до 120 мм (при виконанні цієї операції в ручному режимі, як це було вказано вище, відстань сягає 80 мм).

На космічних апаратах, які тривалий час функціонують, є вірогідність виникнення різних аварійних ситуацій, зокрема пошкодження корпусних оболонок космічних модулів (рис. 7) і порушення їхньої герметичності. Нова апаратура має широкі технологічні можливості для усунення таких пошкоджень методом зварювання. Так, наприклад, для відновлення герметичності корпусу оболонки можна виконати заварювання тріщин, пробоїн, а також приварювання накладок-латок у місці виникнення дефекту (рис. 7, б).

Наземне відпрацювання технології ремонту чарунки оболонки виконувалося на зразках фрагментів плоских панелей із алюмінієвих сплавів 2219 та 5456 (рис. 8, а, б) шляхом герметизації комірки накладкою за допомогою електронно-променевого зварювання. Вибір конструкцій з'єднань та попередні відпрацювання режимів виконувалися на плоских зразках-імітаторах з аналогічних сплавів. Аналіз макрошліфів та геометрія одержаних проплавів на зразках-імітаторах дозволили вибрати оптимальні конструкції зварного з'єднання і режими для приварювання накладок до чарунок панелей із алюмінієвих сплавів. Зовнішній вигляд зварених панелей та фрагменти одержаних з'єднань показано на рис. 8, в — е. Випробування одержаних з'єднань на герметичність показали позитивні результати.

Макро- та мікроструктури зварних з'єднань показано на рис. 9. Були також вивчені хімічний, фазовий та газовий склади цих з'єднань.

Аналіз комплексу технологічних та дослідних робіт показав, що найбільш прийнятним варіан-

том для ремонту оболонок в умовах космосу може бути автоматичний спосіб електронно-променевого зварювання.

Таким чином, технологічні та науково-дослідні експерименти показали, що нове покоління електронно-променевого інструмента для ручного та автоматичного зварювання має високу та надійну дієздатність. Ця апаратура може використовуватися на різних космічних об'єктах при виконанні ремонтно-відновлювальних та монтажних робіт, а також на поверхні Місяця.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Беляков И. Т., Борисов Ю. Д.* Технология в космосе. — М.: Машиностроение, 1974. — С. 7—29.
2. *КОСМОС: технологии, материаловедение, конструкции: сбор. науч. труд. / Под ред. Б. Е. Патона.* — Киев: ИЭС им Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 с. + 24 с. вкл.
3. *Михайловская Е. С., Шульм В. Ф., Загребельный А. А.* Результаты экспериментов по ручной ЭЛС в обитаемой барокамере // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 23—27.
4. *Патон Б. Е., Дудко Д. А., Лапчинский В. Ф. и др.* Применение сварки для ремонта космических объектов // Космические исследования на Украине. — Киев: Наук. думка, 1975. — Вып. 6. — С. 18—21.
5. *Патон Б. Е., Кубасов В. Н.* Эксперимент по сварке металлов в космосе // Автомат. сварка. — 1970. — № 5. — С. 7—12.
6. *Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф.* Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 182 с.
7. *Патон Б. Е., Назаренко О. К., Чалов В. И. и др.* Особенности аппаратуры и процессов электронно-лучевой сварки и резки в условиях космоса // Автомат. сварка. — 1971. — № 3. — С. 3—8.
8. *Суэдзава Э.* Космические станции и колонии. Сварка в космосе // Техника сборки и соединения. — 1989. — № 9. — С. 66—75.
9. *Терновой Е. Г., Шульм В. Ф., Ланкин Ю. Н.* Ремонт фрагментов корпуса международной космической станции с применением электронно-лучевой сварки // Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее: тез. докл. — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2013. — С. 208.

Стаття надійшла до редакції 28.08.17

REFERENCES

1. *Belyakov I. T., Borisov U. D.* Tekhnolohiya v kosmose, p. 7—29 (Mashinostroenie, Moskva, 1974) [in Russian].

2. *SPACE: Technologii, materialovedenie, konstruktsii: sbor. nauch. trud / Pod. red. B. E. Patona*, 528 p. (IES im. E. O. Patona NAN Ukrainy, Kiev, 2000) [in Russian].
3. *Mukhaylovskay E. S., Shulum V. F., Zagrebelnuy A. A. Rezultatu experimentov po ruchnoy ELS v obitaemoy barokamere. Avtomaticheskaya svarka*, N 3, p. 3 — 8 (2002).
4. *Paton B. E., Dudko D. A., Lapchinskiy V. F. Primenenie svarki dlya remonta kosmicheskikh obektov. Kosmicheskie issledovaniya na Ukraine*, N 6, p. 18 — 21 (1975).
5. *Paton B. E., Kubasov V. N. Eksperiment po cvarke v kosmose. Avtomaticheskaya svarka*, N 2, p. 7—12 (1970).
6. *Paton B. E., Lapchinskiy V. F. Svarka i rodstvennye tekhnologii v kosmose*, 182 p. (Naukova dumka, Kiev, 1998).
7. *Paton B. E., Nazarenko O. K., Chalov V. I. Osobennosti apparatury i protsessov elektronno-luchevoy svarki i rezki v usloviyakh kosmosa. Avtomaticheskaya svarka*, N 3, p. 3—8 (1971).
8. *Suedzava E. Kosmicheskie stantsii i kolonii. Svarka v kosmose. Tekhnika sborki i soedineniya*, 9, p. 66—75 (1989).
9. *Ternovoy E. G., Shulum V. F., Lankin Y. N. Renont fragmentov korpusa mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii s primeneniem elektronno-luchevoy svarki. Svarka i rodstvennyy tekhnologii — nastoyashchee i budushchee. tez. dokl.*, 208 p. (Institut elektrosvarki im. E. O. Patona NAN Ukrainy, Kiev, 2013).

Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, Е. А. Аснис,
Е. Г. Терновой, Ю. В. Зубченко

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ В КОСМОСЕ

В институте электросварки им. Е. О. Патона создано новое поколение ручного электронно-лучевого инструмента для сварки и родственных технологий при выполнении монтажных и ремонтно-восстановительных работ на пилотируемых космических аппаратах в открытом космосе. Предусмотрена возможность работы инс-

трумента не только в ручном, а также в автоматическом режиме с использованием робототехнических устройств. Разработанная аппаратура и технологии могут также применяться при выполнении работ, связанных с освоением Луны и при полете на Марс. Проведены работы по отработке технологии сварки алюминиевых и титановых сплавов, а также нержавеющей стали с помощью ручного электронно-лучевого инструмента нового поколения. Полученные результаты исследований сварных соединений подтвердили высокую работоспособность и надежность созданного оборудования.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, родственные технологии, ручной электронно-лучевой инструмент нового поколения, технология сварки, алюминиевые и титановые сплавы, нержавеющие стали, исследования, сварные соединения.

Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, Ю. А. Аснис,
Е. Г. Терновой, Ю. В. Зубченко

E.O. Paton electric welding institute
of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

EQUIPMENT AND TECHNOLOGY FOR ELECTRON-BEAM WELDING IN SPACE

In the Ye. O. Paton Electric Welding Institute a new generation of electron-beam hand tools was created for welding and related technologies. This equipment is used during assembling and repair-restoration work on manned spacecrafts in outer space. It is possible to use the tools not only in a manual but also in automatic mode using robotic devices. The developed equipment and technologies can also be applied during the operations related to the exploration of the Moon and missions to Mars. The new generation tools were used in works on optimization of welding technology for aluminium and titanium alloys as well as stainless steels. The results obtained in investigations of welded joints confirmed the higher efficiency and reliability of the developed equipment.

Keywords: electron-beam welding and related technologies, new generation electron-beam hand tool, welding technology, aluminium and titanium alloys, stainless steels, welded joints.