

РОБОЧЕ МІСЦЕ КОСМОНАВТА-ЗВАРНИКА ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ПОВЕРХНІ МІСЯЦЯ

Н.В. Піскун¹, О.Р. Булацев¹, В.А. Крюков¹, Zeng Ruchuan², Є.Г. Терновий¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: nadamova54@gmail.com

²Beijing Spacecrafts No.104, Youyi Road, Haidian District, Beijing, P.R.C., China. E-mail: ruchuan163@163.com

При освоєнні людиною Місяця актуальним є не тільки створення спеціалізованої електронно-променевої зварювальної апаратури, а й допоміжного обладнання, яким є робоче місце (РМ) космонавта-зварника. У статті описано робочий проєкт на виготовлення РМ космонавта-зварника, яке адаптовано для виконання електронно-променевого зварювання ручним інструментом на навколосезній орбіті та на поверхні Місяця. При розробці РМ враховувалися особливості поверхні Місяця і, в першу чергу, знижена гравітація в порівнянні з Землею, низька температура та наявність і дія місячного пилу (реголітів). Показано, що основними технічними характеристиками РМ космонавта-зварника є: транспортні габарити, масові характеристики, зона обслуговування, вибір конструкції шасі мобільного РМ, а також конкретний вибір електропривода та його живлення (автономне, сонячна батарея, акумулятор або бортова мережа космічної станції). За об'єкт для дослідження та розрахунків було взято типову конструкцію місячного модуля підприємства КБ «Південне». Запропоновано робоче місце космонавта-зварника, виконане у вигляді складеної «колиски», яке у транспортному положенні повинне займати мінімум місця та мати мінімальну вагу. Запропоновано та розглянуто декілька варіантів робочого місця космонавта-зварника за наступними параметрами: габарити в транспортному положенні, кількість рухливих елементів з погляду впливу місячного пилу, маса конструкції, зручність і простота переведення із транспортного положення в робоче. Проведено розрахунки необхідної ваги робочого місця космонавта-зварника для виконання робіт на поверхні Місяця. Наведено заходи, які забезпечують надійність роботи РМ у відкритому космосі та на поверхні Місяця. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: робоче місце, космонавт-зварник, електронно-променеве зварювання, космічне апаратобудування

Вступ. При освоєнні навколосезного простору та поверхні Місяця потрібно буде виконувати монтажні, а у ряді випадків і ремонтно-відновлювальні роботи. При цьому електронно-променеве зварювання є пріоритетним технологічним процесом при виготовленні конструкцій у космічному апаратобудуванні, який дозволяє створювати надійні з'єднання з гарантованою герметичністю без зниження їх міцності та зі збереженням масогабаритних характеристик [1]. В останні роки цей вид зварювання знов стає популярним серед дослідників [2].

Електронно-променевий інструмент нового покоління, створений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України для виконання зварювання та споріднених процесів, спроможний працювати як в ручному (при виконанні робіт космонавтом-зварником), так і в роботизованому варіанті.

Існує багато ситуацій, коли без космонавта-дослідника не можна обійтися. Це – нестандартні ситуації, коли треба оцінити об'єм порушень і визначити методи проведення операції або виконання ремонтних робіт. Є велика кількість операцій (у першу чергу ремонтно-відновлюваних робіт або фіксації фрагментів великогабаритних конструкцій), до яких попередньо підготуватися складно

або неможливо. Крім того, вірогідним є виникнення надзвичайних ситуацій, які потребують термінових технологічних операцій, таких як різання, зварювання або паяння, при яких процес і об'єм операцій будуть визначатися космонавтом безпосередньо на місці виконання робіт.

При освоєнні Місяця велика увага приділяється створенню довготривалих місячних баз (ДМБ) та інфраструктурі для цих споруд. З урахуванням особливих фізичних умов на поверхні Місяця і, в першу чергу, надвисокого вакууму (до 10^{-11} Па), необхідна герметичність конструкцій ДМБ може бути забезпечена за допомогою зварювання. Тому при освоєнні людиною Місяця створення спеціалізованої електронно-променевої зварювальної апаратури і допоміжного обладнання, яким є робоче місце (РМ) космонавта-зварника, є актуальним.

РМ оператора-зварника, що розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, призначене для виконання технологічних і ремонтних операцій у процесі експлуатації модулів баз на поверхні Місяця. Воно необхідне для переміщення оператора до місця проведення робіт із обслуговування та ремонту оболонки космічного модуля з можливістю його підйому, нахилу та обертання навколо вертикальної осі [3].

Піскун Н.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1459-2310>, Zeng Ruchuan – <https://orcid.org/0009-0000-4551-3641>,

Терновий Є.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4323-0944>

© Н.В. Піскун, О.Р. Булацев, В.А. Крюков, Zeng Ruchuan, Є.Г. Терновий, 2025

При виконанні робіт на навколосемній орбіті, яка має висоту близько 300 км, рух літаючого об'єкта супроводжується частими змінами дня і ночі – за кожні 90 хв польоту 45 хв людина знаходиться в темряві. При цьому актуальності набуває також адаптація людини до сонячних променів, яскравість яких збільшується вдвічі. Тому виникає необхідність створення штучного освітлення робочого місця космонавта-зварника при роботі в повній темряві.

Мета цієї роботи – створення робочого місця космонавта-зварника, яке відповідає сучасним вимогам до космічного обладнання, використовує сучасну елементну базу та нові матеріали.

Для досягнення цієї мети у відділі «Космічні технології» ІЕЗ ім. Є.О. Патона був розроблений робочий проєкт на виготовлення РМ космонавта-зварника, яке адаптовано для виконання електронно-променевого зварювання ручним інструментом на навколосемній орбіті чи на поверхні Місяця. При виконанні цих робіт враховувалися особливості поверхні Місяця і, в першу чергу, знижена гравітація у порівнянні з Землею, низька температура та наявність і дія місячного пилу.

Створення робочого місця оператора-зварника. Запропоновано концепцію: створити робоче місце космонавта – оператора-зварника, яке дає можливість комфортної роботи людині в скафандрі при виконанні вказаних робіт при монтажі конструкцій ДМБ та інших робіт.

При розробці РМ оператора-зварника виходили з умов, що необхідно буде зварювати елементи конструкції ДМБ діаметром 3000 мм, завдовжки 6000 мм і завтовшки 6 мм.

Основними технічними характеристиками РМ космонавта-зварника є: транспортні габарити, масові характеристики, зона обслуговування, вибір конструкції шасі мобільного РМ, а також конкретний вибір електропривода та його живлення (автономне, сонячна батарея, акумулятор або бортова мережа космічної станції). РМ повинно бути виконане у вигляді складеної конструкції, яка у транспортному положенні займає мінімальний об'єм при мінімальній вазі у залежності від вибраного матеріалу конструкції.

У даній роботі в якості об'єкта дослідження та розрахунків було взято типову конструкцію місячного модуля підприємства КБ «Південне». Модуль горизонтальної орієнтації являє собою зварну алюмінієву конструкцію з циліндричної оболонки, шпангоутів і торосферичних днищ. Зовнішній діаметр модуля дорівнює 3000 мм, а опори РМ мають можливість регулюватися по висоті на 100 мм.

На рис. 1 наведено загальний вигляд типової конструкції місячного модуля [4]. Для збільшення

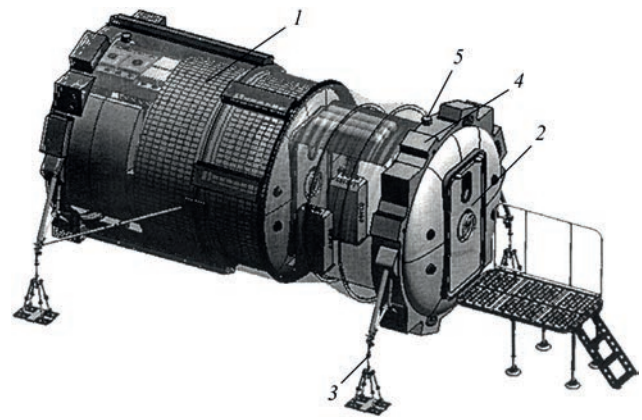


Рис. 1. Загальний вигляд типової конструкції місячного модуля горизонтальної орієнтації із захистом [4]: 1 – силова оболонка із зовнішнім покриттям; 2 – гермодвері; 3 – установочні опори; 4 – пристрій стикування; 5 – пристрій скидання тиску

величини руху по висоті опори мають можливість додаткового ручного регулювання (можливість збільшення руху на 100 мм). Послідовне з'єднання подібних блоків в одну конструкцію з різними призначеннями, такими як житлові та дослідницькі модулі, дозволяють створити базу, достатню для перебування людини на Місяці.

Враховуючи ці фактори, запропоновано та розглянуто кілька варіантів конструкцій РМ космонавта-зварника з дотриманням основних вимог: мінімальні габарити в транспортному положенні, обмежена кількість рухливих елементів, мінімальна маса конструкції завдяки вибраному термозміцненому алюмінієвому сплаву 2219 з тепловідбивним покриттям по всій поверхні конструкції [4, 5]. При цьому забезпечується зручність і простота переведення із транспортного положення в робоче. Зручність виконання технологічних робіт може бути забезпечена положенням оператора на різних позиціях маніпулятора: від мінімального нижнього положення до максимального верхнього. Забезпечується також можливість проміжних положень оператора, наприклад при роботі з усунення дефектів на поверхні модуля. У цьому варіанті положення оператора нахилене. З огляду на дію зниженої гравітації комфортність виконання технологічних робіт погіршується, для чого повинна виконуватися надійна фіксація оператора відносно робочого об'єкта.

При виконанні робіт на поверхні Місяця для здійснення процесу ручного електронно-променевого зварювання спеціалізоване РМ космонавта-зварника є одним із найскладніших завдань у загальному комплексі обладнання для роботи у космосі [6]. Вирішення цієї проблеми дасть можливість зафіксувати космонавта-зварника для точної координації складних рухів при зварюванні.

Довгострокова експлуатація та обслуговування такого складного й об'ємного обладнання вимагає

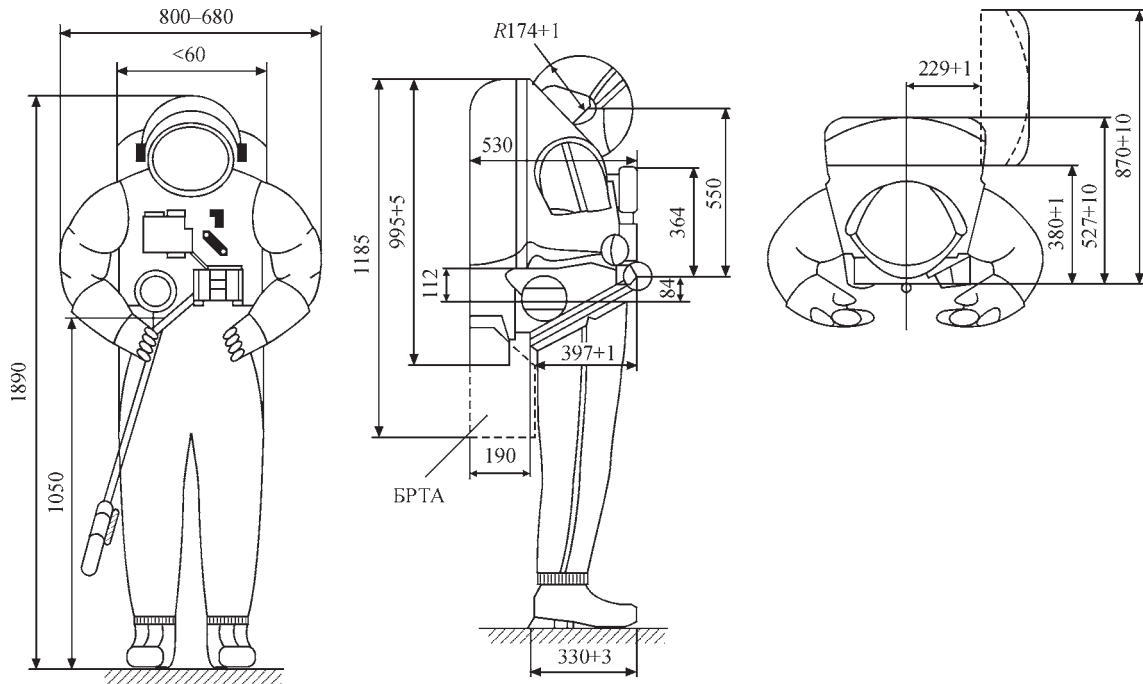


Рис. 2. Орієнтовні габарити космонавта в скафандрі

створення засобів монтажного і планово-попереджувального ремонту. Це може бути перфорація обичайки в результаті випадкового механічного впливу або від удару метеорита. Одним з основних елементів для вирішення цього завдання є створення зварювального інструмента та робочого місця зварника для усунення дефектів, що виникли у результаті цих явищ.

До технічних характеристик робочого місця оператора-зварника відносяться: транспортні габарити, масові характеристики, матеріал для виготовлення, зона обслуговування, вибір конструкції шасі мобільного робочого місця, а також конкретний вибір електропривода та його живлення [7].

На рис. 2 представлені орієнтовні габарити космонавта в скафандрі. Під ці дані була розроблена площадка зварника – «колиска». Розроблявся єдиний варіант «колиски», тому що цей пристрій безпосередньо пов'язаний з оператором-зварником і змінюватися не може.

Безпосередньо робоче місце виконане у вигляді складеної «колиски» (рис. 3). У транспортному положенні вона повинна займати мінімум місця та мати мінімальну вагу. Спеціальні захвати втримують фронтальну раму «колиски» в транспортному положенні та забезпечують фіксацію всіх елементів у такому вигляді. У робочому положенні захвати втримують бічні рами «колиски» у вертикальному положенні. На платформі робочого місця встановлено скобу для запобігання зісковзуванню ніг зварника під час нахилу робочого місця при роботі у верхній зоні. Нахил робочого місця на кут приблизно 30° забезпечується приводом тангажа, а

поворот робочого місця на кут $\pm 15^\circ$ здійснюється приводом повороту. Обидва ці приводи розташовані на кінці другого важеля переміщення робочого місця.

На рис. 4 наведено проміжні перетворення «колиски» із транспортного положення в робоче. По-спільно показано процес розкриття всіх елементів конструкції. Запірний поручень відкривається та закривається оператором-зварником у процесі входу в «колиску» поворотом рукоятки.

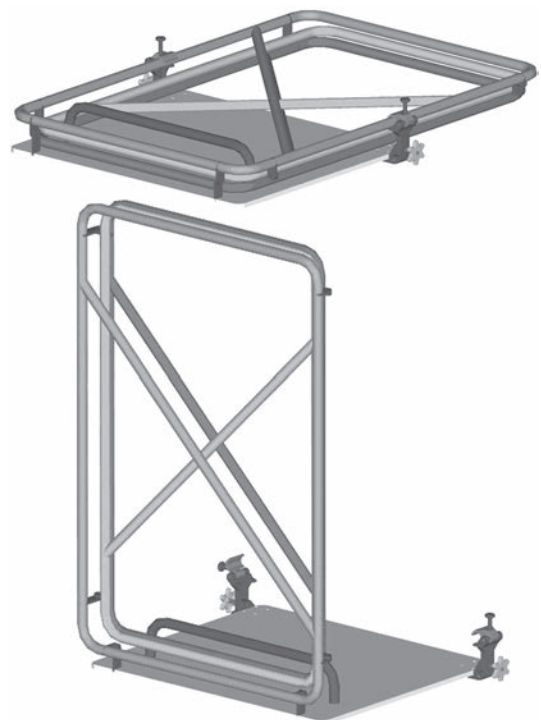


Рис. 3. «Коліска» в транспортному положенні

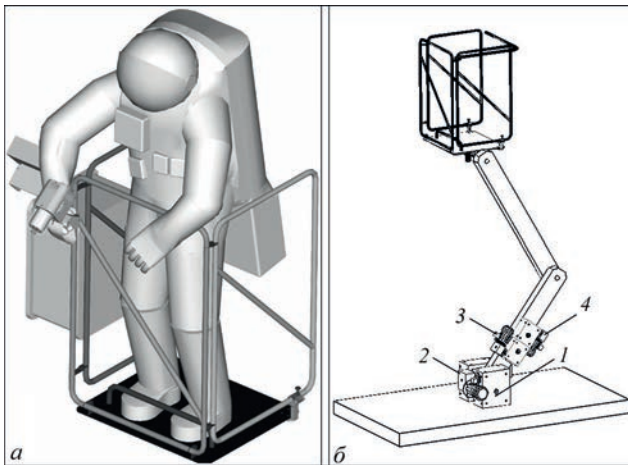


Рис. 4. Загальне компонування площадки оператора-зварника та розташування технологічного блоку з гніздом для інструмента та пультом керування в «колісці»: площадка оператора-зварника (а), маніпулятор з приводами 1, 2, 3, 4 (б)

Варіанти виконання РМ космонавта-зварника.

Було запропоновано та розглянуто декілька варіантів робочого місця космонавта-зварника за наступними параметрами: габарити в транспортному положенні, кількість рухливих елементів, маса конструкції, зручність і простота переведення із транспортного положення в робоче. Якість робіт зі зварювання значною мірою залежить від положення космонавта-зварника. Роботи зі зварювання виконуються людиною в скафандрі у вертикальному положенні. На рис. 5 наведено варіанти положення оператора при виконанні роботи з усунення дефектів на поверхні модуля, при цьому довелося нахилити оператора. З огляду на низьке значення гравітації це цілком можливо. Циліндр (зовнішній діаметр якого дорівнює 3000 мм) спирається на опори, що регулюються. Виходячи з цих вихідних даних, проводилася розробка технічних про-

позицій. Нахил робочого місця під кутом $\sim 300^\circ$ забезпечується кроковим приводом, а робоче місце поворотом на кут $\pm 150^\circ$ здійснюється приводом обертання.

Вказаний варіант має кращі показники з транспортного укладання пересувного робочого місця. Переміщення робочого місця повинне здійснюватися за допомогою чотириколісного візка з керованими упорами.

За результатами вибору варіантів робочого місця оператора було виготовлено 2D модель, в основу якої було покладено вказаний варіант. У деяких проміжних положеннях площадка оператора не мала можливості пройти повз зовнішню поверхню модуля.

Для того, щоби площадка пройшла, необхідно було переміщувати візок робочого місця, а такі дії неприпустимі, тому що візок повинен стояти на опорах домкратів під час роботи оператора на робочому місці. Це примусило зробити деякі зміни довжини та положення кріплення основи маніпулятора. Було перенесено кріплення основи маніпулятора в положення над віссю заднього колеса, довжину першого важеля збільшили до 1500 мм, а довжину другого важеля – до 1800 мм.

На рис. 5, е показано верхнє положення робочого місця, яке дає можливість обслуговувати верхню поверхню модуля. Ця модель дала можливість прослідкувати, як відбувається взаємодія оператора, робочого місця та корпусу модуля при переміщенні з нижньої точки до верхньої, які команди оператор повинен видавати з пульта управління на маніпулятор. У таблиці наведено нові розміри робочого місця оператора-зварника.

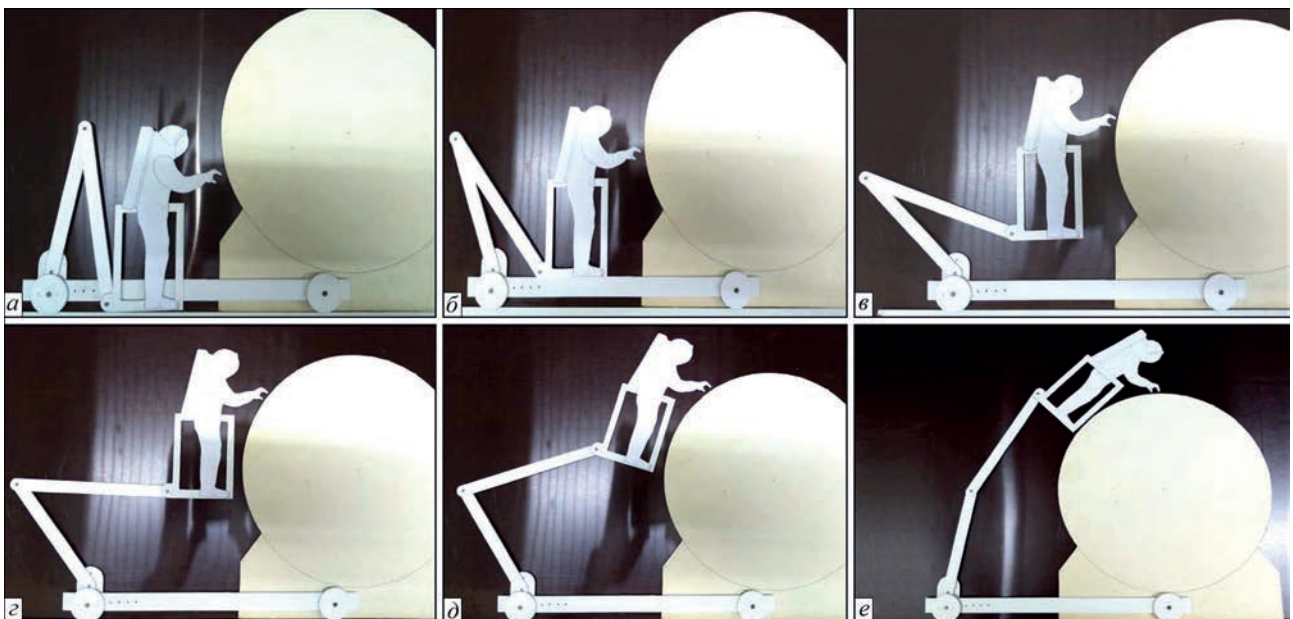


Рис. 5. Проміжні фази положення робочого місця під час обслуговування модуля

Розміри робочого місця оператора

Параметр	Величина, мм
База між колесами РМ	3000
Довжина першого важеля маніпулятора РМ	1500
Довжина другого важеля маніпулятора РМ	1800
Діаметр модуля	3000
Глибина площадки РМ	820
Висота площадки РМ	1060
Ширина візка РМ	220
Відстань між поверхню візка та віссю кріплення першого важеля	100

Пульт керування робочим місцем повинен мати наступні команди. Для візка: вперед, назад, вліво, вправо, опустити, підняти домкрати. Для маніпулятора робочого місця: вперед, назад, вгору, вниз, вліво, вправо, нахил, прямо, вихідне положення. Вихідне положення – це коли оператор знаходиться в самому нижньому положенні (рис. 5, а).

Наступним етапом робіт був вибір принципів розміщення та підбору приводів, які встановлюються на «руці» маніпулятора РМ (рис. 4, б). Було розглянуто кілька варіантів розміщення приводів. Приводи 1 і 2 повинні відповідати за переміщення площадки з оператором-зварником і блоками електроживлення та керування. Крім того, ці приводи відповідальні за переміщення самої конструкції робочого місця. Вага оператора-зварника в скафандрі – ~220 кг. Вага всіх блоків – ~25 кг. Вага конструкції робочого місця повинна бути ~130 кг. Тобто сумарна вага всіх елементів, які переміщуються в просторі, ~375 кг. На Місяці вага в 6 разів менша, ніж на Землі, тобто дорівнює ~62,5 кг. Відстань від центру кріплення першого шарніру до центру мас – ~2 м. Тоді момент, потрібний для переміщення оператора-зварника, дорівнює 125 кг·м. Приводи 1 і 2 мають момент до 165 кг·м, а приводи 3 і 4 – 40 кг·м. На етапі технічних пропозицій було обрано наступні приводи – мотор-редуктори NMRV 150/075 і NMRV 090/040.

Було розглянуто декілька варіантів розміщення приводів керування положенням «руки» маніпулятора, нахилом і поворотом РМ в основі візка. Найоптимальнішим є варіант маніпулятора РМ з розміщенням приводів керування положенням «руки» маніпулятора, нахилом і поворотом РМ в основі візка, що ще більше зменшує навантаження на маніпулятор і значно поліпшує його характеристики. Переміщувана вага в цьому варіанті найменша, а зона обслуговування більша, ніж у всіх інших.

Надійність РМ забезпечується наступними заходами:

– застосуванням перевіреної елементної бази з необхідними параметрами та характеристиками, що забезпечують їхню експлуатацію в умовах, які

мають місце на різних етапах наземної підготовки та при проведенні експерименту;

– забезпеченням якості виготовлення відповідно до діючої на підприємстві системи якості;

– використанням при проектно-конструкторських опрацюваннях необхідних коефіцієнтів безпеки;

– проведенням необхідного обсягу наземних експериментів, застосуванням прогресивних методик із використанням граничних режимів випробувань з імітацією умов, що мають місце в штатних і позаштатних ситуаціях.

Висновки

1. РМ оператора-зварника, яке призначене для виконання технологічних і ремонтних операцій у процесі експлуатації модулів станції на поверхні Місяця, є невідокремленою частиною обладнання для зварювання.

2. РМ оператора-зварника необхідне для розміщення оператора до місця проведення робіт із обслуговування та ремонту оболонки космічного модуля з можливістю його підйому, нахилу та обертання навколо вертикальної осі.

3. Розробка спеціалізованого РМ космонавта-зварника є одним із найскладніших завдань у загальному комплексі обладнання для роботи в космосі. Воно дає можливість зафіксувати космонавта-зварника, що необхідно для точної координації складних рухів, які забезпечують якісне та стабільне ручне електронно-променеве зварювання на орбіті чи на поверхні Місяця.

Список літератури

1. Патон Б.Є. (2023) Перспективи застосування зварювання в космосі. *Автоматичне зварювання*, 3, 1–15.
2. Інтернет ресурс <https://thinkorbital.com/news/launch-of-first-welding-system/>
3. Патон Б.Є., Гавриш С.С., Шулим В.Ф. и др. (2000) Ручные электронно-лучевые технологические работы в космосе. *Космос: Технологии, Материаловедение, Конструкции*. Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б.Е. Патона. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, сс. 191–215.
4. Degtyarev, A.V., Lobanov, L.M., Kushnar'ov, A.P. et al. (2020) On possibilities for development of the common-sense concept of habitats beyond the Earth. *Acta Astronautica*, Vol. 170, 487–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.014>
5. Paton, B.E. et al. (1999) Device for manual electron beam processing of materials in Space. United States, Pat. № 5,869,801.
6. Hlushak, S.O. (2023) Evolution of electron beam hardware for welding in Space. *The Paton Welding J.*, 8, 78–84. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.11>
7. Патон Б.Є., Булацев О.Р., Перепеченко Б.І. та ін. (2000) Пристрій робочої станції для проведення експериментів у космосі. Патент на винахід № 95020653. Опубл. 15.09.2000., Бюл. № 14.

References

1. Paton, B.E. (2023) Prospects for the application of welding in Space. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, 3, 1–15 [in Ukrainian].

2. <https://thinkorbital.com/news/launch-of-first-welding-system/>
3. Paton, B.E., Gavrish, S.S., Shulim, V.F. et al. (2000) Manual electron beam technological work in space. In: *Space: Technologies, Materials Science, Structures*. Ed. by B.E. Paton, Kyiv, PWI, 191–215 [in Russian].
4. Degtyarev, A.V., Lobanov, L.M., Kushnaryov, A.P. et al. (2020) On possibilities for development of the common-sense concept of habitats beyond the Earth. *Acta Astronautica*, **170**, 487–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.014>
5. Paton, B.E. et al. (1999) Device for manual electron beam processing of materials in Space. United States, Pat. № 5,869,801.
6. Hlushak, S.O. (2023) Evolution of electron beam hardware for welding in Space. *The Paton Welding J.*, **8**, 78–84. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.11>
7. Paton, B.E., Bulatsev, O.R., Perepechenko, B.I. et al. (2000) Device of the work station for conducting experiments in Space. Patent on invention 95020653, Publ. 15.09.2000

WORKPLACE OF A COSMONAUT-WELDER FOR WELDING OF OBJECTS ON THE SURFACE OF THE MOON

N.V. Piskun¹, O.R. Bulatsev¹, V.A. Kryukov¹, Zeng Ruchuan², Ye.H. Ternovy¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: nadamova54@gmail.com

²Beijing Spacecrafts No.104, Youyi Road, Haidian District, Beijing, P.R.C., China. E-mail: ruchuan163@163.com

When man explores the Moon, not only the creation of specialized electron beam welding equipment, but also of auxiliary equipment, which is the workplace (WP) of a cosmonaut-welder, is very relevant. The paper describes the working project for the manufacture of the cosmonaut-welder workplace. The workplace of a cosmonaut-welder presented in the work is adapted for performing electron beam welding with the hand tool in the Earth orbit and on the surface of the Moon. Development of the WP took into account the peculiarities of the surface of the Moon and, first of all, the reduced gravity compared to the Earth, low temperature, and the presence and effect of lunar dust (regolith). It is shown that the main technical characteristics of the cosmonaut-welder WP are as follows: transport dimensions, weight characteristics, service area, selection of the chassis design of the mobile WP, as well as the specific selection of the electric drive and its power source (autonomous, solar battery, battery or onboard network of the space station). The object of research and calculations was a typical design of a lunar module of the DB «Yuzhnoje» enterprise. The proposed workplace of the cosmonaut-welder is made in the form of a folded «cradle». In the transport position, it should take up a minimal space and have a minimal weight. Several variants of the cosmonaut-welder workplace are proposed and considered according to the following parameters: dimensions in the transport position, number of moving elements from the point of view of the influence of lunar dust – regoliths, the weight of the structure, convenience and ease of transfer from the transport position to the working position. Calculations of the weight of the cosmonaut-welder workplace required for performing the work on the surface of the Moon have been carried out. The measures that ensure reliable operation of the cosmonaut-welder workplace in open space and on the surface of the Moon are given. 7 Ref., табл. 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: workplace, cosmonaut-welder, electron beam welding, spacecraft engineering

Отримано 27.09.2024

Отримано у переглянутому вигляді 30.10.2024

Прийнято 07.01.2025

3D ДРУК ДЕТАЛЕЙ З РІЗНИХ КОМБІНАЦІЙ МЕТАЛІВ

Ця нова технологія стала неабияким досягненням для машинобудування та автомобілебудування. Винахідникам вдалося бездоганно міцно поєднати в одній деталі сталь і алюміній.

Дослідники зробили значний прорив у галузі 3D друку металів, розробивши технологію створення легких і міцних багатокомпонентних деталей.

Вченим вдалося успішно об'єднати в одній деталі сталь і алюміній, що раніше вважалося складним завданням через ризик утворення крихких з'єднань різних металів.

Ключем до успіху стала лазерна порошкова плавка Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) — одна з найпоширеніших технологій 3D друку металів. Вчені виявили, що збільшення швидкості сканування лазера під час друку значно знижує ймовірність утворення слабких місць у матеріалі. Це пов'язано з тим, що при високій швидкості сканування метали тверднуть швидше, і це зменшує час на утворення тендітних інтерметалічних сполук.

Використовуючи цю технологію, дослідники створили прототип стійкої підвіски автомобіля, що складається зі сталі та алюмінію. Ця деталь має високу міцність і при цьому значно легша за традиційні аналоги.

Це досягнення відкриває нові перспективи для автомобільної промисловості. Завдяки 3D друку можна створювати деталі з унікальною геометрією, що дасть змогу оптимізувати конструкцію автомобілів і знизити їхню вагу. Крім того, нова технологія дасть змогу виробляти екологічно чистіші транспортні засоби, оскільки 3D друк дає змогу скоротити кількість відходів виробництва.

Вчені планують продовжити дослідження та застосувати розроблену технологію до інших комбінацій металів. Це дасть змогу розширити сферу застосування 3D друку в різних галузях промисловості.

