

<https://doi.org/10.15407/knit2024.01.080>
УДК 621.791:629.78

Л. М. ЛОБАНОВ, заст. дир., д-р техн. наук, проф., акад. НАН України. Заслужений діяч науки і техніки України (2004), Золота медаль ім. Б. Патона «За видатні досягнення у створенні інноваційних науково-технічних розробок, які знайшли широке практичне використання» (2022)

ORCID: 0000-0001-9296-2335

E-mail: office@paton.kiev.ua

Н. В. ПІСКУН, зав. відділу, д-р техн. наук

ORCID:0000-0003-1459-2310

E-mail: nadamova54@gmail.com

Є. Г. ТЕРНОВИЙ, заст. зав. відділу

ORCID:0000-0002-4323-0944

E-mail: ev-geo@ukr.net

С. О. ГЛУШАК, наук. співроб.

ORCID: 0000-0003-4518-7262

E-mail: electriber@ukr.net

В. А. КРЮКОВ, пров. інж.-конструктор

E-mail: valesik51@ukr.net

Т. М. ХАРКІВСЬКА, пров. інж.-конструктор

ORCID:0000-0002-2792-265X

E-mail: kharpal@ukr.net

І. І. СТАТКЕВИЧ, наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-9403-2123

E-mail: statkevich_igor@ukr.net

В. Ф. ШУЛИМ, наук. співроб.

ORCID:0000-0001-7795-5831

E-mail: vshulym@gmail.com

В. О. ЗАКОРКО, пров. інж., аспірант

E-mail: vladimir.zakorko@gmail.com

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України
вул. Казимира Малевича 11, Київ, Україна, 03150

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ГАРМАТА ДЛЯ РУЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ В УМОВАХ ПОВЕРХНІ МІСЯЦЯ

В останні роки в космічній тематиці все більший акцент робиться на питаннях освоєння Місяця. Не останню увагу приділяють вирішенню проблем, пов'язаних із забезпеченням необхідних життєвих умов для астронавтів, із побудованням та збиранням на місці великої кількості технічних приладів та споруд. Експлуатація та розвиток орбітальних комплексів, а

Цитування: Лобанов Л. М., Піскун Н. В., Терновий Є. Г., Глушак С. О., Крюков В. А., Харківська Т. М., Статкевич І. І., Шулим В. Ф., Закорко В. О. Електронно-променева гармата для ручного зварювання в умовах поверхні Місяця. *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 1 (146). С. 80–91. <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.080>

© Видавць ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

також перспективні завдання створення споруд на місячній і марсіанській поверхні, передбачають впровадження технологій монтажу та ремонту космічних об'єктів.

При роботі у відкритому космосі виконується велика кількість ремонтно-відновлюваних операцій, а також фіксування фрагментів великогабаритних конструкцій, до яких попередньо підготуватися складно і неможливо. Крім того, можлива вірогідність надзвичайних ситуацій, які потребують термінових технологічних операцій різання, зварювання або паяння, при яких процес та об'єм операції будуть визначатися космонавтом безпосередньо на місці, де він зможе оцінити об'єм та спосіб виконання необхідних робіт. Тому необхідним є створення сучасного електронно-променевого обладнання для ручного зварювання, що буде сприяти продовженню строку експлуатації космічного об'єктів, а іноді і збереженню життя екіпажів. Це обладнання повинно бути компактним та ефективно здійснювати операції з електронно-променевого зварювання та споріднених технологій в умовах місячної поверхні.

Результати проведених у відкритому космосі експериментів із ручного електронно-променевого зварювання свідчать про те, що апаратура, яка була створена раніше, дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1.5 мм. Водночас товщина матеріалу, який використовується при виготовленні оболонок пілотованих космічних апаратів, досягає 4...6 мм, а довжина зварювальних швів може сягати декількох метрів.

Метою цієї роботи є створення обладнання нового покоління, яке дозволить вирішити проблему зварювання матеріалів від 4 до 6 мм, що в основному використовуються в сучасній аерокосмічній техніці.

Ключові слова: електронно-променево зварювання, обладнання для зварювання, монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт, обладнання для ручного електронно-променевого зварювання, тріодна емісійна система гармати, електронно-оптична система гармати, кросовер.

ВСТУП

Необхідність зварювальних та інших технологічних операцій на поверхні Місяця вимагає дуже серйозного підходу до конструювання зварювального обладнання. Особливості фізичних умов на поверхні Місяця накладають обмеження на конструктивні матеріали розроблюваної апаратури та її експлуатаційні можливості. Головними з цих умов є надвисокий вакуум (до 10^{-11} Па), коливання температури вдень і вночі (відповідно $+130$ °C та -170 °C), відсутність магнітного поля та зменшена у шість разів порівняно із земною сила тяжіння.

Жорсткі фізичні умови на поверхні Місяця суттєво впливають на специфіку виконання монтажних та ремонтно-відновлюваних робіт, таких як зварювання, різання, паяння та нанесення покриттів. Це, у свою чергу, вимагає забезпечення специфічних характеристик обладнання, призначеного для реалізації різних технологічних процесів в умовах Місяця.

Створений раніше ручний інструмент (УРІ), який було розроблено та виготовлено в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (ІЕЗ) і випробувано на космічній орбіті [9], а також ручний інструмент «Універсал» [5—8] мають такі недоліки, як невеликий ресурс роботи катода (не більш ніж 1 год) та електростатичне фокусування електронного

пучка (діаметр пучка понад 2.5 мм при робочій відстані 40...50 мм). Крім того, суміщення електронно-променевої гармати з високовольтним джерелом живлення в одному моноблоці, який має великі габарити та вагу, заважає виконувати необхідні технологічні процеси і спостерігати за ними.

При виконанні даної роботи запропоновано концепцію нового ручного електронно-променевого інструмента, який містить електронно-променево гармату, що з'єднується з джерелом живлення за допомогою високовольтного гнучкого кабеля зі з'єднувачем і має можливість формувати гострофокусний пучок діаметром не більш ніж 1 мм у фокальній площині на відстані до 80 мм без застосування фокусувальної електромагнітної лінзи, що дає змогу оператору виконувати технологічні процеси без надмірних зусиль і забезпечить зручне спостереження за ними при достатній відстані від місця об'єкта.

Електронно-оптична система ручної гармати, особливо для використання її в умовах низької гравітації, повинна мати тріодну емісійну систему, яка складається з катода, фокусувального електрода та анода. Тому на відміну від раніше використовуваних гармат з діодними емісійними системами та прямонакальними катодами нову гармату оснащено тріодною емісійною системою з катодом типу «таблетки» (із гексабориду

лантану або танталу), який підігрівается електронним бомбардуванням, а безінерційне керування струмом пучка відбувається зміною керівної напруги на фокусувальному електроді.

Згідно із цією концепцією розроблено технічну документацію на компактну електронно-променеву гармату зі збільшеною потужністю генерованого електронного променя для перспективних завдань зварювання в умовах надвисокого вакууму космічного простору. У даній роботі реалізовано алгоритм фокусування електронного променя за допомогою лише довгофокусної емісійної системи гармати, що спрощує використання її ручного варіанта оператором-космонавтом. З метою максимального підвищення ефективності апаратури при одночасному забезпеченні її мінімально можливих масогабаритних характеристик було розроблено нову електронно-оптичну систему гармати, яка сприяла підвищенню питомої потужності електронного променя. За рахунок цього було збільшено плавильну здатність електронного променя.

У запропонованій гарматі електронний промінь має максимально можливу ламінарність і розрахункову питому потужність у зоні зварювання до 12 кВт/мм², що дозволяє здійснити якісне зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм, а також титанових сплавів та нержавіючих сталей товщиною до 4...6 мм.

Розроблена при виконанні цієї роботи електронно-променева гармата також відрізняється від обладнання попереднього покоління підвищеною потужністю електронного пучка (до 2.5 кВт), з'єднанням з джерелом живлення за допомогою гнучкого високовольтного кабеля, застосуванням автономного швидкозмінного катодного вузла із терміном його заміни не більше 3.5 хв.

У гарматі застосовано також пристрій для компенсації просторового заряду пучка у просторі його дрейфу на поверхні Місяця, де навколишній вакуум досягає 10⁻¹¹ Па.

СПЕЦІАЛІЗОВАНА АПАРАТУРА ДЛЯ РУЧНОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Технічні характеристики електронно-променевої гармати нового покоління. Для використання у складі комплексу апаратури, призначеної для

електронно-променевого зварювання в умовах поверхні Місяця, розроблено інструмент з електронно-променевою гарматою (ЕПГ) нового покоління, що відрізняється від застосовуваних у відкритому космосі. За прототипи для створення нового інструмента взято відомі технологічні макети електронно-променевих гармат У-729 та ПЛ-101, які пройшли випробування в наземних умовах, в термобарокамері і на літаючій лабораторії ТУ-104А. На відміну від діодних прямонакальних гармат, які використовувались в інструментах УРІ та «Універсал» у складі моноблока з джерелом живлення, а також від діодної гармати з непрямим підігрівом лантан-боридного катода У-729, нова гармата має тріодну емісійну систему, підключену до високовольтного джерела живлення гнучким високовольтним кабелем зі з'єднувачем. Космонавт-оператор у такому випадку буде працювати в ручному режимі тільки з малогабаритною гарматою невеликої ваги, оснащеною швидкозмінним катодним вузлом, що спрощує заміну витратного комплектування без додаткового юстування. Така гармата дозволяє споживати менший струм (5...10 А) у мережі розжарення для підігрівання лантан-боридного катода порівняно з діодними прямонакальними гарматами, які неможливо підключити до джерела живлення гнучким кабелем з малим перерізом з причини завеликого струму (18...20 А) для безпосереднього нагрівання катода.

Значення вихідних параметрів нової ручної гармати для використання в умовах Місяця приведено нижче.

Прискорювальна напруга	до 10 кВ
Струм пучка	0...250 мА
Тип емісійної системи	тріодна
Напруга запирання	0...5 кВ
Конструкція катодного вузла	швидкозмінний
Спосіб підігріву катода	електронне бомбардування
Напруга електронного бомбардування	800...1200 В
Струм електронного бомбардування	0...60 мА
Напруга розжарення підігрівача	2...5 В
Струм розжарення підігрівача	до 10 А
Матеріал катода	LaB ₆ , Та, W
Фокусування	електростатичне, довгофокусне
Діаметр фокуса	до 1.0 мм

Робоча відстань	до 85 мм
Матеріал ізоляторів	Al ₂ O ₃
Габарити гармати:	
довжина	≤ 250 мм
діаметр	≤ 80 мм
Маса	2.5 кг
Ресурс роботи катода	до 20 год
Час заміни швидкозмінного	до 3.5 хв
катодного вузла	
Час безперервної роботи гармати	до 15 хв
(при увімкненому розжаренні катода)	
Час охолодження гармати	до 15 хв
між включеннями розжарення катода	

Ручна електронно-променева гармата укомплектована пристроєм — «гардою» для захисту руки оператора від м'якого рентгенівського опромінювання. Ручна гармата також комплектується захисною решіткою, яка монтується на анодному блоці гармати і захищає оператора від доторкання до розпечених поверхонь.

Умови проходження електронного пучка в гарматі [12]. Формування електронного пучка в емісійній системі гармати відбувається під дією електричного поля у прискорювальному проміжку цієї системи, а саме між катодом, фокусувальним електродом та анодом з урахуванням відштовхувальної дії на електронні траєкторії просторового заряду пучка. При цьому у прискорювальному проміжку емісійної системи гармати, як і на всьому шляху електронів від катода до зварюваного виробу, відбувається іонізація залишкового газу електронами пучка, яка характеризується часом іонізації t_i [1]:

$$\tau_i = \frac{0.169}{P \cdot \epsilon_i(U_{\text{пр}}) \sqrt{U_{\text{пр}}}},$$

де P — тиск у просторі польоту електронного пучка, $\epsilon_i(U_{\text{пр}})$ — відносна іонізація, $U_{\text{пр}}$ — напруга прискорення.

При звичайному робочому тиску у проміжку прискорення порядку 5 мПа утворені тут позитивні іони швидко покидають його, тобто під дією прискорювальної напруги летять на катод, не встигаючи вплинути на негативний просторовий заряд пучка. Як результат — компенсації цього заряду іонами тут не відбувається.

Після виходу з анодного каналу електронний пучок далі проходить у напрямку до зварювано-

го виробу у так званому просторі дрейфу, де немає будь-якого зовнішнього електричного поля. У цьому проміжку електрони летять за інерцією із швидкістю V_e , яку набули у прискорювальному полі емісійної системи гармати. При малих швидкостях (далеких від швидкості світла) маємо [3]:

$$V_e = 5.95 \cdot 10^7 \cdot \sqrt{U_{\text{пр}}},$$

де V_e — швидкість електронів, см/с.

При проходженні пучка електронів у середовищі залишкових газів та пари матеріалу зварюваного виробу мають місце як парні, так і колективні взаємодії. У цих умовах визначальним фактором стає знак потенціалу на осі пучка, який залежить від співвідношення $\tau_{\text{идр}}/\tau_i$ ($\tau_{\text{идр}}$ — час життя створених іонів на осі пучка у просторі дрейфу). При $\tau_{\text{идр}}/\tau_i > 1$, коли іони швидко видаляються та повільно утворюються, просторовий заряд пучка має залишатися некомпенсованим. При $\tau_{\text{идр}}/\tau_i < 1$ іони швидше утворюються, ніж видаляються, і пучок стає повністю скомпенсованим, тобто його власний негативний просторовий заряд повністю нейтралізований. Той чи інший механізм компенсації цього заряду при рівних інших умовах насамперед залежить від ступеня вакууму у просторі дрейфу.

Так, у звичайних наземних промислових електронно-променевих зварювальних установках ступінь вакууму у робочих вакуумних камерах не перевищує 8...10 мПа. У цих умовах у просторі дрейфу пучка настає повна компенсація його просторового заряду і пов'язана з цим можливість досягнення значної питомої потужності пучка у місці зварювання, тому що просторовий заряд при цьому не обмежує мінімальний переріз пучка у фокальній площині.

Однак, як показали численні дослідження, при тиску у просторі дрейфу гармати нижче 3...7 мПа (практично для умов на поверхні Місяця) просторовий заряд електронного пучка може бути значно недокомпенсованим. Відтак матиме місце значне розширення пучка у просторі дрейфу, що призведе до зменшення питомої потужності пучка, а відповідно і його здатності до проплавлення у місці зварювання.

Як показали результати експериментів, при зміні тиску від 7 до 0.4 мПа при проходженні

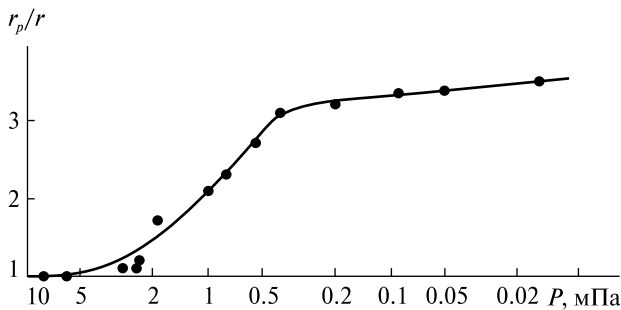


Рис. 1. Відносна залежність радіуса поперечного перерізу пучка від якості (рівня) вакууму

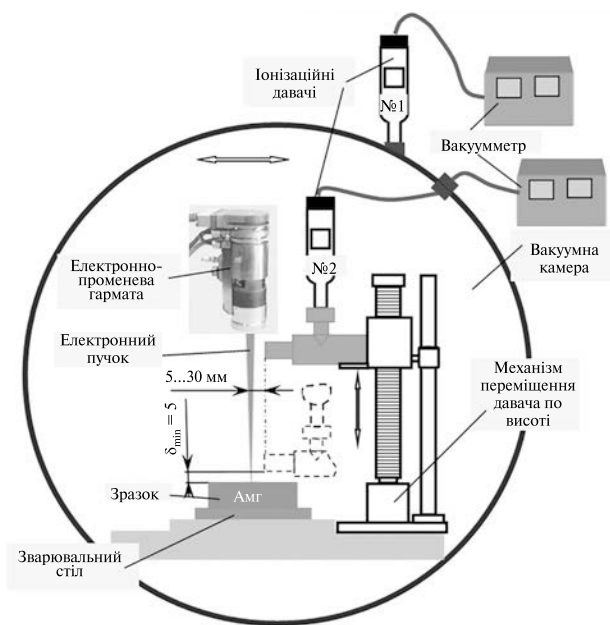


Рис. 2. Схема експерименту з оцінювання погіршення вакууму в просторі дрейфу пучка при зварюванні зразка

електронним пучком з енергією 15 кеВ відстані 80 мм його ефективний радіус $r_e(P)$ збільшується більш ніж у три рази порівняно з ефективним радіусом r проникнення у простір дрейфу (рис. 1).

Пошуки причин погіршення вакууму у просторі дрейфу. Для оцінки погіршення вакууму у зоні дрейфу за рахунок зустрічного парогозового потоку з розплавленої ванни під час операції зварювання ставився спеціальний експеримент у вакуумній камері в наземних умовах.

У ході експерименту (рис. 2) у вакуумній камері на маніпуляторі вертикально закріплюва-

лась електронно-променева гармата ПЛ 101. На робочій відстані гармати $L_{роб} = 100$ мм на робочому столі встановлювалась водоохолоджувана мідна мішень, у центральне заглиблення якої вкладався штифт з алюмінієвого сплаву АМгб.

На спеціальному механізмі вертикального переміщення було закріплено горизонтально вакуумний іонізаційний давач № 2 (ПМИ-2 — перетворювач монометричний індукційний), зорієнтований своїм вхідним отвором до спільної вертикальної осі гармата — штифт. Такий же давач № 1 використовувався для замірювання загального вакууму всередині камери.

Експеримент починався з того, що у процесі відкачування камери досягали однакових показань ступеня вакуумів обидва давачі (№ 1 та № 2). Після цього включали електронний пучок з малим струмом, переміщали гармату до поєднання пучка з центром штифта. Давач № 1 вертикальним переміщенням підводили максимально впритул до поверхні штифта. Включали струм пучка 80 мА, фокусували його на штифті і починали переміщення давача № 1 знизу догори, фіксуючи показання цього давача в залежності від вертикальної координати його розміщення. При цьому наближали вхідний отвір давача № 1 максимально близько до периферії пучка. Заміри показань давача № 1 робили вздовж усього його вертикального переміщення від мішені до нижнього торця гармати. При цьому слідкували за тим, щоб давач № 2 не змінював своїх показань у бік підвищення загального тиску в камері. Експеримент повторювали декілька разів в діапазоні струмів пучка від 40 до 120 мА.

Головний результат проведеного експерименту полягає в тому, що вздовж осі електронного пучка в напрямку від місця зварювання до нижнього торця гармати (тобто упродовж робочої відстані гармати) вакуум погіршується не більше, ніж на порядок порівняно з вакуумом у навколишньому середовищі вакуумної камери (в умовах проведеного експерименту з 0.4 до 4 мкПа). Якщо застосувати ці результати до умов Місяця, то стає зрозумілим, що таке погіршення вакууму є неефективним, щоб запобігти розширенню пучка у просторі дрейфу. Звідси виникає висновок, що потрібно застосовувати ефектив-

ніший спосіб погіршення вакууму у просторі дрейфу гармати.

З цією метою було запропоновано, з нашого погляду, набагато ефективніший і одночасно простіший спосіб погіршення вакууму у просторі дрейфу, а саме регульована подача газу безпосередньо у простір дрейфу, при тому що сам простір дрейфу має бути обмеженим на всій його довжині стінками променепроводу. Подача газу може відбуватися від невеликого балона, який може розташовуватися на корпусі гармати або на робочому місці оператора-зварника в затемненій зоні і приєднуватися до променепроводу гармати за допомогою тонкого і легкого шланга паралельно з низьковольтними кабелями. Керування подачею газу з балона може здійснюватися за допомогою інжектора (типу автомобільного) самим оператором-зварником за допомогою додаткової кнопки на рукоятці зварювального інструмента або кнопки на виносному пульті керування інструментом, закріпленому поблизу зони проведення робіт.

Запропоноване обладнання може стати також корисним у ролі ефективного охолоджувача зварювальної гармати між сеансами, коли після завершення зварювальної операції або її частини потрібно скоріше охолодити гармату перед наступним етапом зварювальних робіт. Для цього між зварювальними сеансами закривають вихідний отвір променепроводу та вихідний канал диференційного відкачування і вмикають подачу газу у променепровід. При цьому охолоджений газ через отвір у аноді вдується у внутрішню порожнину гармати і безпосередньо і швидко охолоджує найбільш теплонавантажені деталі та вузли гармати, а саме анод, катод, підігрівач, деталі високовольтного ізолятора і швидкозмінного катодного вузла. У такій функції газ, який подається у гармату для проміжного охолодження, може забезпечити охолодження гармати за 10...15 хв після попередньої безперервної роботи протягом 5...10 хв.

Одним із способів охолодження гармати як під час її роботи, так і під час перерви між робочими етапами може бути використання в її конструкції так званих теплових труб. За допомогою останніх можна відводити зайве тепло від

теплонавантажених вузлів гармати до елементів її власної конструкції або допоміжних пристроїв, які в цей час перебувають у тіні, або завдяки спеціальним покриттям та механічній обробці мають високі випромінювальні або дзеркальні властивості.

Потрібно зауважити, що газ для закачування у згадані балони можна буде одержувати безпосередньо в умовах Місяця з використанням розробленої гармати, яка з допомогою електронно-го пучка розкладатиме гірські породи.

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ГАРМАТИ

З метою максимального підвищення ефективності апаратури при одночасному забезпеченні її мінімально можливих масогабаритних характеристик було розроблено нову електронно-оптичну систему гармати. Для цього було проаналізовано шляхи підвищення щільності струму у фокальній площині пучка. Електронно-оптична система ручної гармати повинна мати тільки одну складову — тріодну емісійну систему, яка складається з катода, фокусувального електрода та анода.

При розробці нової тріодної емісійної системи було використано добре апробовану методику оптимізації таких систем на основі траєкторного аналізу, яка базується на одночасному розв'язуванні задач аналізу і синтезу [2, 13].

Оптимізована тріодна емісійна система розробляється у двох модифікаціях — довгофокусній і короткофокусній. На рис. 3 схематично зображено довгофокусну емісійну систему, призначену для використання переважно у гарматі, що є складовою частиною малогабаритного ручного електронно-променевого інструмента [14]. У цьому випадку емісійна система формує промінь, який фокусується безпосередньо в зоні зварювання, враховуючи, що при зварюванні металів малих товщин у більшості випадків фокальну площину променя розташовують на поверхні зразка. Питома потужність променя в зоні зварювання, і, як результат, його здатність до проварювання цілком залежать від площі перерізу променя в його фокальній площині, тобто від діаметра променя в кросовері [2, 13].

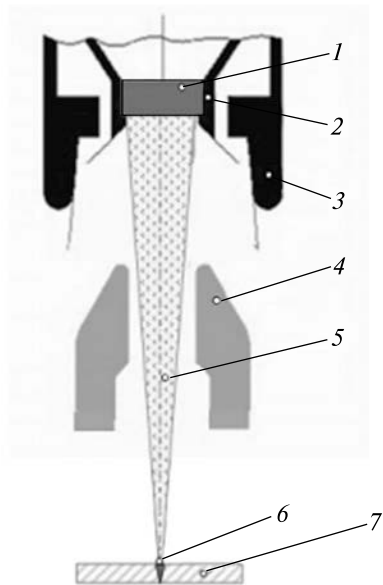


Рис. 3. Нова довгофокусна тріодна емісійна система електронно-променевої гармати, $U_{np.} = 10$ кВ, $I_w = 250$ мА [4]: 1 — катод LaB6, 2 — катодотримач, 3 — керівний електрод, 4 — анод, 5 — електронний пучок, 6 — сфокусований пучок, 7 — зварюваний зразок

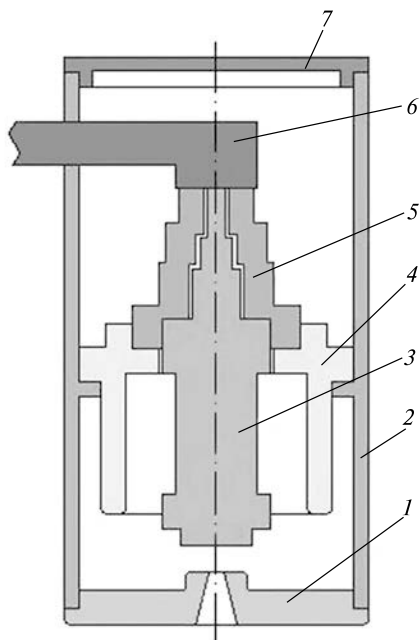


Рис. 4. Загальна компоновка нової електронно-променевої зварювальної гармати [11]: 1 — анодний блок, 2 — корпус, 3 — з'ємний катодний вузол, 4 — високовольтний ізолятор, 5 — головний ізолятор катодного вузла, 6 — високовольтне введення, 7 — кришка

Згідно з методикою емісійна система будується з початковим використанням її необхідних геометричних та електричних параметрів, таких як прискорювальна напруга, кут α збіжності променя перед кросовером, діаметр катода типу «таблетка» з плоскою емісійною поверхнею, наявність реальних конструктивних елементів фіксації катода в його утримувачі, конфігурація кільцевого проміжку між катодом і фокусувальним електродом та приблизна проста форма анода.

Отримані в результаті розрахунків контури фокусувального електрода та розташування анода апроксимуємо комплексом простих для виготовлення поверхонь (конічних, циліндричних) (рис. 4). Насамкінець виконуємо траєкторний аналіз апроксимованої емісійної системи і отримуємо шуканий струм пучка $I_w = 250$ мА при напрузі запирання $U_M = -70$ В на фокусувальному електроді.

Слід зазначити, що у будь-якій тріодній емісійній системі зі зменшенням струму пучка від його максимуму до нуля первинний кросовер наближений до катода. У ручному інструменті у подібному випадку (наприклад, зменшення струму пучка при виведенні зварного кратера) для підтримки положення фокуса (кросовера) пучка на поверхні зварюваного виробу оператору необхідно вручну наближати гармату до виробу. У електронно-оптичній системі інструмента ця операція спрощується завдяки тому, що струм пучка може бути функціонально пов'язаний зі струмом електромагнітної лінзи, і в усьому діапазоні струмів пучка його вторинний кросовер не змінюватиме свого положення [14].

З використанням отриманих експериментальних та розрахункових результатів було розроблено спочатку ескізний, а за ним і робочий проект електронно-променевої гармати, призначеної для зварювання та споріднених технологій в умовах Місяця [11]. У табл. 1 приведено задані та отримані значення параметрів емісійної системи.

Інформацію про розміри і розташування кросовера (рис. 4) отримуємо шляхом розбудови фазового паралелограма по результатах розрахунків згідно з методикою [15].

При цьому гармата не повинна мати рідинної охолоджувальної системи, як це робиться у

звичайних промислових зварювальних гарматах, хоча, як і в згаданих звичайних гарматах, катод і підігрівач в робочих умовах розжарюються до тієї ж температури 1800 °С (катод з гексобориду лантану) і 2000 °С (вольфрамова спіраль розжарення).

У зв'язку з високими робочими температурами згаданих вище теплонавантажених деталей та вузлів на стадії ескізного проектування було запропоновано виготовляти високовольтний ізолятор та ізолятор швидкозмінного катодного вузла із суцільних заготовок з корунду, які після відливання їх у прес-формах і доробки шліфуванням головних посадкових місць були б конструктивно готовими для сполучення з відповідними деталями гармати (корпусом, деталями швидкозмінного катодного вузла). При цьому в конструкції ізолювальних вузлів не застосовувались будь-які температурно нестійкі матеріали, а тільки корунд і метал (переважно ковар та нержавіюча сталь або титан).

На етапі розробки робочого проекту було запропоновано збирати головні ізолювальні вузли гармати з найпростіших по формі корундових деталей, таких як кільця та труби. Гармату в цілому скомпоновано з окремих функціональних блоків (рис. 5) [15].

Для роботи гармати в умовах надвисокого навколишнього вакууму (10^{-11} Па) на поверхні Місяця її оснащено додатковим вузлом, розташованим на виході з анода. Цей вузол складається з променепроводу, який екранує електронний пучок на всій його протяжності від анода до місця зварювання, та пристрою, за допомогою якого в середину променепроводу подається газ від малогабаритного газового балона (рис. 5). Балон може кріпитися безпосередньо на корпусі гармати або на робочому місці оператора-зварника в затемненій зоні і приєднуватися до променепроводу за допомогою тонкого і легкого шланга. Подача газу з балона може здійснюватися з допомогою інжектора (наприклад типу автомобільного) самим оператором-зварником за допомогою додаткової кнопки на рукоятці зварювального інструмента або кнопкою на виносному пульті керування інструментом, закріпленому поблизу зони проведення робіт.

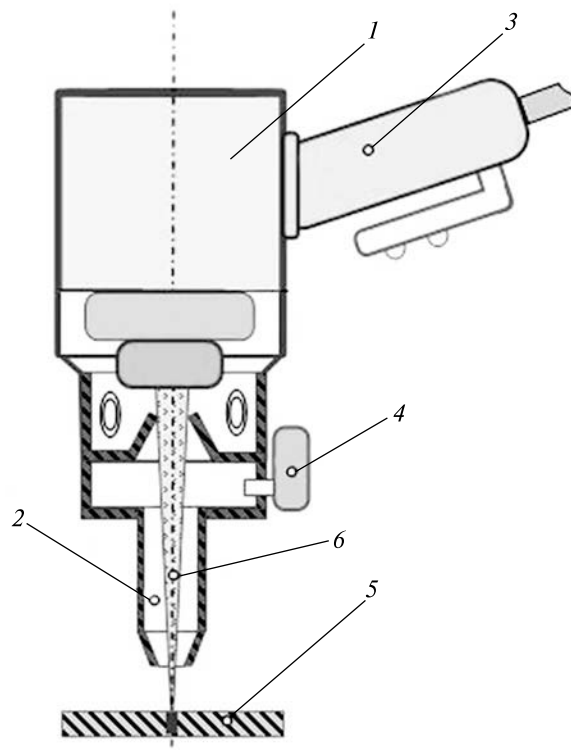


Рис. 5. Конструкція електронно-променевої гармати для зварювання на поверхні Місяця: 1 — гармата, 2 — променепровід-компенсатор просторового заряду пучка, 3 — рукоятка, 4 — система напуску газу в променепровід, 5 — зварюваний виріб, 6 — електронний пучок

Таблиця 1. Параметри емісійної системи

Параметр	Задане значення	Отримане значення
Первеанс, $A/V^{3/2}$	$\leq 0.2 \cdot 10^{-6}$	$0.2 \cdot 10^{-6}$
Потужність пучка, кВт	≥ 2.0	2.5
Щільність потужності в кросовері, кВт/мм ²	≥ 6.0	6.5
Половинний кут збігання пучка в кросовері, рад	$\leq 2 \cdot 10^{-2}$	$1.25 \cdot 10^{-2}$

Розроблена електронно-променева гармата з'єднана з джерелом живлення з допомогою гнучкого високовольтного кабеля. Передбачається швидка автономна зміна катодного вузла (не більш ніж 3.5 хв). Відповідно до прийнятої концепції було створено технічну документацію на електронно-променево гармату для ручного зварювання на поверхні Місяця.

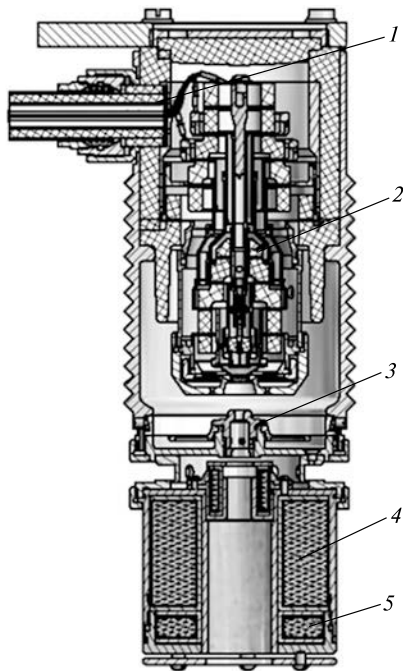


Рис. 6. Поздовжній переріз (А — А) тріодної електронно-променевої гармати з електромагнітним фокусуванням для ручних технологічних робіт в космосі: 1 — високовольтне введення, 2 — катодний блок, 3 — анодний блок, 4 — комбінована фокусувальна система, 5 — система відхилення

На рис. 6 показано повздовжній переріз (А — А) тріодної електронно-променевої гармати з електромагнітним фокусуванням для ручних технологічних робіт в космосі.

Загальний вигляд розробленого ручного електронно-променевого інструмента з різною робочою відстанню до зварного з'єднання для технологічних робіт в космічних умовах показано на рис. 7 [10].

Довгофокусна емісійна система завдяки високій ламінарності променя формує кросовер на заданій робочій відстані $L_{роб} = 100$ мм діаметром 0.6 мм при максимальному струмі променя 250 мА, при цьому максимальна питома потужність променя в кросовері досягає 9 кВт/мм².

ВИСНОВКИ

1. Розроблено нову конструкцію електронно-променевої гармати потужністю 2.5 кВт з при-

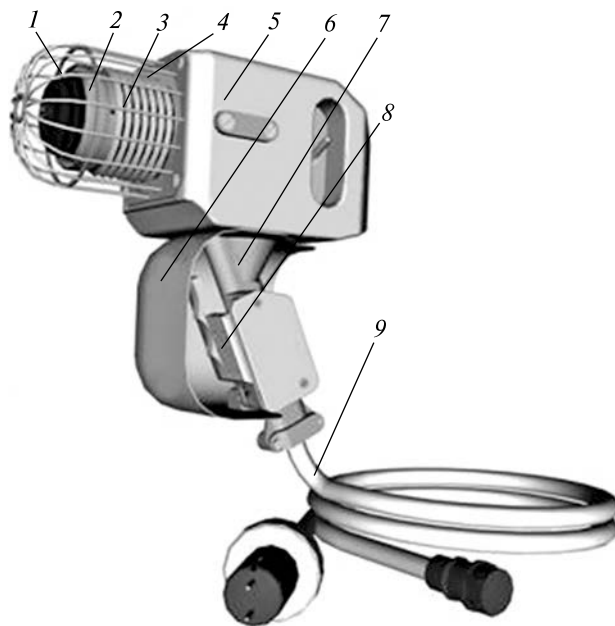


Рис. 7. Загальний вигляд ручного електронно-променевого інструмента для зварювання в умовах космосу [12]: 1 — анодний блок, 2 — катодний блок, 3 — радіатор охолодження, 4 — захисна сітка, 5 — корпус катодного блока, 6 — гарда, 7 — рукоятка, 8 — гашетка, 9 — кабель з високовольтним з'єднувачем

скорювальною напругою 10 кВ для зварювання при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт в космічних умовах та на поверхні Місяця.

2. Розраховано та спроектовано тріодні емісійні системи, які формують електронний пучок високої якості, достатньої для електронно-променевого зварювання різних металів товщиною 4...6 мм.

3. Експериментальні дослідження зміни вакууму у просторі дрейфу гармати свідчать, що у межах зварювальних параметрів гармати (до 1.5 кВт) при прискорювальній напрузі 10 кВ розподіл парогазового потоку зі зварювальної ванни уздовж осі пучка при зварюванні сплаву АМг6 підкорюється закону косинуса вищого порядку, а погіршення вакууму на осі пучка на робочій відстані 100 мм не перевищує одного порядку при загальному вакуумі у вакуумній камері біля 7 мПа. Це підтверджує необхідність застосу-

вання допоміжних засобів погіршення вакууму у просторі дрейфу пучка для обмеження його розширення в умовах навколишнього вакууму вище 1 мПа.

4. Запропоновано та розроблено варіант конструкції гармати, в яких розширення електронного пучка при навколишньому вакуумі понад 1 мПа обмежується завдяки локальному погіршенню вакууму на шляху пучка у просторі дрейфу гармати та на її робочій відстані.

5. Завдяки високій якості формування пучка в синтезованій емісійній системі та, як результат, підвищеній щільності струму пучка у місці зварювання (до 9 кВт/мм²) гармата буде спроможна виконувати зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм.

Дослідження і розробки, описані в роботі, проводилися в рамках Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр.

ЛІТЕРАТУРА

1. Акопянц К. С., Зубченко Ю. В. Методика расчета электронно-оптической системы сварочной пушки. *Автомат. сварка*. 1979. № 11. С. 33—36.
2. Воробьев Г. С., Барсук И. В., Дрозденко А. А. Методы формирования и анализа интенсивных пучков электронов в статических электромагнитных полях (обзор). *Журн. нано- и электронной физ.* 2011. 3(3). С. 63—77.
3. Воробьев Г. С., Дрозденко А. А., Пономарев А. Г. Переходное излучение в диагностике высокоинтенсивных электронных пучков. *Харьков. нанотехнологическая Ассамблея*. 2007. № 2. С. 219—223.
4. Зубченко Ю. В., Терновой Е. Г. Разработка новых эмиссионных систем электронно-лучевых пушек для технологических работ в условиях космоса. *Автомат. сварка*. 2015. № 12. С. 38—40.
5. Михайловская Е. С., Шулым В. Ф., Загребельный А. А. Результаты экспериментов по ручной ЭЛС в обитаемой барокамере. *Автомат. сварка*. 2002. № 2. С. 23—27.
6. Никитский В. П., Лапчинский В. Ф., Загребельный А. А., Гавриш С. С., Стесин В. В., Шелягин В. Д. Испытание ручного электронно-лучевого инструмента в открытом космосе. *Космос: Технологии, Материаловедение, Конструкции*: Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б. Е. Патона. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. С. 183—191.
7. Патон Б. Е., Гавриш С. С., Шулым В. Ф., Булацев А. Р. 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, 2000. С. 191—215.
8. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Бернадский В. Н., Лапчинский В. Ф., Загребельный А. А., Стесин В. В., Чалов В. И. Возможности ручной электронно-лучевой сварки в космосе. *Космос: Технологии, Материаловедение, Конструкции*. Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б. Е. Патона. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. С. 179—183.
9. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. *Сварка и родственные технологии в космосе. Особенности и перспективы*. Киев: Наук. думка, 1998. 182 с.
10. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Аснис Ю. А., Терновий Є. Г., Зубченко Ю. В. Обладнання і технологія для електронно-променевого зварювання в космосі. *Космічна наука і технологія*. 2017. 23, № 4. С. 27—32.
11. *Патент України на винахід № 118896*. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Терновий Є. Г., Зубченко Ю. В. Пристрій для ручного електронно-променевого зварювання і споріднених технологій у відкритому космосі. Опубл. 25.03.2019 р., Бюл. № 6.
12. Agafonov A. V., Bogachenkov V. A., Krastelev E. G. High-current electron beam guiding by the creation of profiled plasma channel. *Вопросы атомной науки и техники*. 2004. № 1. С. 35—37.
13. Chunxu L. I., Chengdan H. E., Qijin X. U., JIANG Caiyun, Design of Electrostatic Focusing for Space Electron Beam Welding Gun. *Chinese J. Aeronaut.* 2005. 18(3). P. 256—262. doi: 10.1016/s1000-9361(11)60307-5
14. Lobanov L. M., Asnis E. A., Ternovy Ye. G., et al. Some issues of repairing manned space vehicles in outer space using electron beam welding. *Solid State Phenomena*. 2021. 315. P. 101—105. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.315.10>
15. Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Y. U., et al. New electron beam gun for welding in space. *Sci. and Technology of Welding and Joining*. 2019. 24(4). P. 320—326.

REFERENCES

1. Akopyants K. S., Zubchenko Yu. V. (1979). Methodology for calculating the electron-optical system of a welding gun. *Automatic welding*, No 11, 33–36.
2. Vorobyov G. S., Barsuk I. V., Drozdenko A. A. (2011). Methods for the formation and analysis of intense electron beams in static electromagnetic fields (review). *J. Nano- and Electronic phys.*, No 3(3), 63–77.
3. Vorobyov G. S., Drozdenko A. A., Ponomarev A. G. (2007). Transition radiation in the diagnostics of high-intensity electron beams. *Kharkiv Nanotechnological Assembly*, No 2, 219–223.
4. Zubchenko Yu. V., Ternovoy E. G. (2015). Development of new emission systems of electron beam guns for process operations under space conditions. *The Paton Welding J.*, No 12, 34–38. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.12.07>
5. Mikhailovskaya E. S., Shulym V. F., Zagrebelny A. A. (2002). Results of experiments on manual EBW In a manned space simulation test chamber. *Automatic welding*, No 2, 23–27.
6. Nikitsky V. P., Lapchinsky V. F., Zagrebelny A. A., Gavrish S. S., Stesin V. V., Shelyagin V. D. (2000). Testing a hand-held electron beam instrument in outer space. *Space: Technologies, Materials Science, Structures: Collection of scientific papers*. Ed. B. E. Paton. Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, 183–191.
7. Paton B. E., Gavrish S. S., Shulym V. F., Bulatsev A. R. (2000). Manual electron beam technological work in space. *Space: Technologies, Materials Science, Structures: Collection of scientific papers*. Ed. B. E. Paton. Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, 191–215.
8. Paton B. E., Dudko D. A., Bernadsky V. N., Lapchinsky V. F., Zagrebelny A. A., Stesin V. V., Chalov V. I. (2000). Possibilities of manual electron beam welding in space. *Space: Technologies, Materials Science, Structures: Collection of scientific papers*. Ed. B. E. Paton. Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, 179–183.
9. Paton B. E., Lapchinsky V. F. (1998). *Welding and related technologies in space. Features and prospects*. Kyiv: Nauk. Dumka. 182 p.
10. Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Yu. A., Ternovy E. G., Zubchenko Yu. V. (2017). Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Science and Technology*, **23**(4), 27–32. <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.027>
11. *Patent for invention No 118896*. Paton B. E., Lobanov L. M., Ternovy E. G., Zubchenko Yu. V. Device for manual electron-mechanical welding and advanced technologies in open space [in Ukrainian].
12. Agafonov A. V., Bogachenkov V. A., Krastelev E. G. (2004). High-current electron beam guiding by the creation of profiled plasma channel. *Probls Atomic Sci. and Techn.*, No 1, 35–37.
13. Chunxu L. I., Chengdan H. E., Qijin X. U. (2005). JIANG Caiyun, Design of Electrostatic Focusing for Space Electron Beam Welding Gun. *Chinese J Aeronaut.*, **18**(3), 256–262. [https://doi.org/10.1016/s1000-9361\(11\)60307-5](https://doi.org/10.1016/s1000-9361(11)60307-5).
14. Lobanov L. M., Asnis E. A., Ternovy Ye. G., et al. (2021). Some issues of repairing manned space vehicles in outer space using electron beam welding. *Solid State Phenomena*, **315**, 101–105. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.315.101>
15. Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Y. U., et al. (2019). New electron beam gun for welding in space. *Sci. and Technology of Welding and Joining*, **24**(4), 320–326. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1534794>

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023

Після доопрацювання 30.11.2023

Прийнято до друку 05.12.2023

Received 20.10.2023

Revised 30.11.2023

Accepted 05.12.2023

L. M. Lobanov, deputy. director, Dr. Sci. in Tech., prof., acad. NAS of Ukraine. Honored Worker of Science and Technology of Ukraine (2004), Gold Medal. B. Paton “For outstanding achievements in the creation of innovative scientific and technical developments that have found wide practical use” (2022)

ORCID: 0000-0001-9296-2335

E-mail: office@paton.kiev.ua

N. V. Piskun, Head of the Department of Space Technologies, Dr. Sci. in Tech.

ORCID: 0000-0003-1459-2310

E-mail: nadamova54@gmail.com

Ye. G. Ternovyi, Deputy Head of the Department of Space Technologies

ORCID: 0000-0002-4323-0944

E-mail: ev-geo@ukr.net

S. O. Hlushak, Researcher.

ORCID: 0000-0003-4518-7262

E-mail: electriber@ukr.net

V. A. Kriukov, Leading Design Engineer

E-mail: valesik51@ukr.net

T. M. Kharkivska, Leading Design Engineer

ORCID:0000-0002-2792-265X

E-mail: kharpal@ukr.net

I. I. Statkevich, Researcher.

ORCID: 0000-0001-9403-2123

E-mail: statkevich_igor@ukr.net

V. F. Shulym, Researcher.

ORCID:0000-0001-7795-5831

E-mail: vshulym@gmail.com

V. O. Zakorko, Leading Engineer, Graduate Student

E-mail: vladimir.zakorko@gmail.com

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

11 Kazimir Malevich Str., Kyiv, 03150 Ukraine

ELECTRON-BEAM GUN FOR MANUAL ELECTRON-BEAM WELDING IN LUNAR SURFACE CONDITIONS

In recent years, increasing attention in space topics has been paid to the exploration of the Moon. Not the least attention is paid to solving problems related to providing the necessary living conditions for astronauts, with the construction and assembly of a large number of technical devices and structures on site. The operation and development of orbital complexes, as well as the promising tasks of creating structures on the lunar and Martian surfaces, involve the introduction of technologies for the installation and repair of space objects.

When working in open space, there are a large number of operations (first of all, repair and restoration or fixation of fragments of large-sized structures), for which it is difficult and impossible to prepare in advance. In addition, there is a possibility of emergencies that require urgent cutting, welding, or soldering technological operations, in which the process and volume of the operation will be determined by the cosmonaut directly on the spot, where he will be able to assess the volume and method of performing the necessary work. Therefore, the creation of modern electron-beam equipment for manual welding, which will contribute to the extension of the life of space objects and sometimes to the preservation of the lives of crews, is necessary. This equipment must be compact and efficiently perform operations on electron beam welding and related technologies under lunar surface conditions.

The results of manual electron beam welding experiments carried out in open space indicate that the equipment, which was created earlier, makes it possible to weld stainless steels, titanium and aluminum alloys up to 1.5 mm thick. At the same time, the thickness of the material used in the manufacture of shells of manned space vehicles reaches 4...6 mm, and the length of welding seams can reach several meters.

The purpose of this work is to create a new generation of equipment that will solve the problem of welding materials from 4 to 6 mm, which are mainly used in modern aerospace technology.

Keywords: electron-beam welding, equipment for welding, assembly and repair work, equipment for manual electron-beam welding, triode emission system of the gun, electron-optical system of the gun, crossover.