

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

ГЛУШАК

Сергій Олександрович

УДК 539.234:620.186:539.52

**РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО – ПРОМЕНЕВОГО
ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ КОСМОСУ**

Спеціальність 05.03.06.
«Зварювання та споріднені процеси і технології»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2024

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший дослідник
Піскун Наталія Василівна
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ,
завідувач відділу «Космічні технології»

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук
Федоров Олег Павлович
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, м. Київ,
директор

доктор технічних наук, професор
Квасницький Віктор Вячеславович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського» МОН України, м. Київ,
завідувач кафедри зварювального виробництва

Захист відбудеться «*18*» вересня 2024 року о 10⁰⁰ годині на засіданні докторської спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

Автореферат розіслано «*29 жовтня*» 2024р.

Учений секретар
докторської спеціалізованої Вченої ради
Д 26.182.01
доктор технічних наук



Олег МАХНЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Створення фізичних основ космічних технологій потребує розробки відповідної апаратури, постановки та проведення численних експериментів. Крім вивчення фундаментальних закономірностей поведінки та формування матеріалів у космічних умовах, важливим є також прикладне завдання: забезпечити можливість відновлення та ремонту численних конструктивних, функціональних космічних літальних апаратів та інших великогабаритних конструкцій, розрахованих на експлуатацію в космічному просторі та на поверхні Місяця протягом тривалого часу. Це завдання залишається актуальним, а роботи дослідників останніх років, пов'язані з більш ефективним використанням космічного вакууму, додали до цього нові можливості та перспективи промислової експлуатації космосу, як технологічного середовища.

Застосування зварювальних процесів в космосі необхідне насамперед для виготовлення, монтажу та ремонту великогабаритних конструкцій космічних станцій, як на навколоремній орбіті, так і при освоєнні Місяця, де планується створювати довготривалі місячні бази (ДМБ), а також інші об'єкти, що забезпечують життєдіяльність і роботу експедицій.

Електронно-променево зварювання (ЕПЗ) є оптимальним і більш технологічним процесом для виконання цих робіт, порівняно з іншими способами зварювання. Високий вакуум та низькі температури, які є природним середовищем в космічних умовах, сприяють використанню електронно-променевих технологій, у тому числі й зварювальних. При цьому процесі ефективний ККД становить 85-90 %, що є максимальним значенням в порівнянні з іншими способами зварювання. Процес ЕПЗ в умовах земної гравітації дозволяє забезпечити механічні та хімічні властивості, а також вакуумну щільність зварних з'єднань на рівні основного металу конструкції.

Особливості фізичних умов у відкритому космосі: високий вакуум, різке коливання температури на освітленій та затемненій сторонах, знижена дія сили гравітації потребують створення спеціалізованого обладнання і, відповідно, технологій при виконанні зварювальних робіт.

Узагальнення накопиченого досвіду та результати проведених у відкритому космосі експериментів із ручного електронно-променевого зварювання, які наведені в роботі, свідчать про те, що апаратура, що була створена раніше, дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1,5 мм. В 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.

Тому є необхідним створення обладнання нового покоління з підвищеною потужністю, що дозволить вирішити проблему зварювання матеріалів завтовшки до 6 мм та дасть можливість розробити сучасний технологічний процес, при якому за один прохід можна виконувати електронно-променево зварювання та термообробку.

В даний час зварні конструкції з алюмінію та його сплавів отримали широке застосування в промисловості, особливо конструкції, що працюють в умовах складних навантажень, підвищених та низьких температур, тобто, у космічному апаратобудуванні. Завдяки малій масі, досить високій питомій міцності та корозійній стійкості алюмінієвих сплавів стало можливим створення конструкцій, здатних працювати тривалий час в умовах космосу.

При виконанні ЕПЗ в умовах надвисокого вакууму, зниженої гравітації та низьких температур цей процес ускладнюється, і, відповідно, якість зварних з'єднань може знизитися. Отримані результати проведених експериментів в таких умовах в космосі, а також на літаючій лабораторії, показали підвищену кількість пор в зварних швах (ЗШ) із алюмінієвих сплавів. Для одержання якісних зварних з'єднань і виключення в ЗШ таких дефектів як пори, тріщини та не сплавлення крайків в корені зварного шва вельми актуальним є розробка технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів, яка дозволить одержувати якісні зварні з'єднання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відділі «Космічні технології» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках науково-дослідних програм, в яких автор брав участь в якості виконавця: 6.1.1.35.74.31(35,74/31) «Дослідження і вдосконалення електронно-променевиx технологічних процесів для космічних умов і розробка нового покоління апаратури для їх реалізації» (№0117U001263 (30.12.16)); 35/69 1.6.1.1.35.69 (35/69) «Розробка обладнання та технології електронно-променевого зварювання для виконання монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця при будівництві та експлуатації довготривалих місячних баз» (№0118U004072 (19.03.18)); 35/1 1.6.3.1.35.1 (35/1) «Розробка обладнання і принципової технології 3D принтингу титанових, алюмінієвих та інтерметалідних сплавів в умовах космічного вакууму, а також процесу спрямованої кристалізації інтерметаліду системи TiAl для використання в аерокосмічній галузі» (№0122U001598 (15.02.2022)).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є створення принципового технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів, який дозволяє в умовах зниженої гравітації одержувати якісні зварні з'єднання, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення з використанням обладнання нового покоління.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити закономірності утворення пор в металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом якісного аналізу основних факторів, які викликають підвищену схильність до утворення несучільностей.
2. Розробити сучасну конструкцію електронно-променевої гармати, яка використовує тріодну емісійну систему, що дозволяє працювати в умовах високого космічного вакууму, потужністю 2,5 кВт з прискореною напругою 10 кВ для здійснення електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів товщиною 6-8 мм, які в основному використовуються в сучасному космічному апаратобудуванні
3. Укомплектувати створене обладнання фокусуючо-відхиляючою системою для гострого фокусування і можливості періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагріву по заданій траєкторії.
4. Розробити принциповий технологічний процес ЕПЗ алюмінієвих сплавів з реверсним перемішуванням зварювальної ванни періодичним відхиленням електронного пучка з програмованою тепловою інтенсивністю.
5. Дослідити вплив параметрів зварювання при виконанні однопрохідного процесу з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою електронного пучка і програмованою дією теплової інтенсивності на формування структури та механічних властивостей зварних з'єднань алюмінієвих сплавів.

Об'єкт дослідження – зварні з'єднання алюмінієвих сплавів 5456 та 2219, які отримані ЕПЗ за допомогою обладнання нового покоління при виконанні процесу з перемішуванням розплавленого металу ванни програмованою дією теплової інтенсивності.

Предмет дослідження – вплив параметрів режимів зварювання і можливостей обладнання, яке створене, на закономірності формування структурного стану та механічні властивості зварних з'єднань алюмінієвих сплавів 5456 та 2219 і верифікація результатів з експериментальними даними попередніх експериментів в умовах відкритого космосу.

Методи дослідження - Технологічні роботи виконували у вакуумному стенді ОБ1469м, в якому були змонтовані маніпулятор з електронно-променевою гарматою ПЛ104. Живлення електронно-променевої гармати здійснювалося від лабораторного джерела ИУН-5 з прискореною напругою 10 кВ. Рентгенівський контроль зварних з'єднань (ЗЗ) здійснювався з метою виявлення прихованих дефектів у з'єднаннях по всій довжині (пори, раковини, тріщини, непровари тощо) і

виконувався на рентгенівському апараті РАП-150/300 (фокус 1.2 мм, $F = 1.0$ м, $U = 100$ кВ, $I = 8.0$ мА, плівка РТ-5). Визначення локального елементного складу ЗЗ із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ, провадилися за допомогою растрового електронного мікроскопа Tescan Mira3 LMU. Оцінка локального елементного складу виконувалась детектором ЕДС Oxford X-max 80 mm, встановленим на растровому електронному мікроскопі. Дослідження особливостей мікроструктури здійснювали на поперечних підготовлених зразках ЗЗ, що включали ділянки основного металу, ЗТВ і металу шва, за допомогою оптичного мікроскопа ММТ-1600В з цифровою камерою Webbers MYscope 300M. Скануюча електронна мікроскопія виконувалась на базі DRON-3М спектрометра. Розподіл поздовжніх напружень у поперечному перерізі зварних зразків проводився із застосуванням електронної спекл-інтерферометрії в поєднанні з висвердлюванням отвору. Механічні випробування основного металу та металу шва зварних зразків проводились на сервогідролінійній машині MTS 318.25 (USA).

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше для електронно-променевого гармата космічного призначення запропонована тріодна електронно-оптична система з довготривалим ресурсом роботи катодного блоку за рахунок комбінованого охолодження.

2. З використанням запропонованої математичної моделі вперше встановлено, що найбільший вплив на стійкість парогазового каналу та кристалізацію бульбашок домішкових газів має співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу, які не суттєво залежать від сили гравітації, а гідростатичний тиск, у свою чергу, знижується при зменшенні сили гравітації, що має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, спричинених локальним схлопуванням каналу в процесі зварювання.

3. Визначено вплив сили гравітації та розміру бульбашок газу на швидкість їх випливання з розплаву. Розрахунковими методами встановлено, що при зниженні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко зростає розмір бульбашок газу, які не встигнуть спливати до повної кристалізації розплаву ванни, і сформують сферичну нещільність металу шва.

4. Вперше для виконання електронно-променевого зварювання запропоновані варіанти розподілу потужності теплової дії електронного пучка, які дозволяють синтезувати керування електронним променем для створення заданого температурного поля при виконанні процесу зварювання з одночасними попереднім підігрівом і подальшою термічною обробкою.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропоновано якісну математичну модель для оцінки схильності металу зварного з'єднання, отриманого кинджальним проплавленням за допомогою висококонцентрованого джерела зварювального нагрівання, до зародження пор в металі зварного шва, за допомогою якої проведений аналіз факторів, що сприяють підвищеному утворенню пор в зварних швах при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

2. Розроблена електронно-променева гармата, яка використовує тріодну емісійну систему, що дозволяє працювати в умовах високого космічного вакууму при прискорювальній напрузі 10 кВ, при цьому, завдяки формуванню електронного пучка високої якості в синтезованій емісійній системі та, як результат, підвищенню щільності струму пучка в місці зварювання (до 9 кВт/мм^2) гармата спроможна виконувати зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм, титанових сплавів та нержавіючих сталей товщиною до 4 мм, які, в основному, застосовують в сучасному космічному апаратобудуванні.

3. Завдяки фокусуєчій та відхиляючій системам гармата має можливість фокусування електронного променя та періодичного відхилення інтенсивності нагріву електронним променем по заданій траєкторії.

4. Розроблена принципова технологія електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів з перемішуванням зварювальної ванни скануючим електронним променем програмованою інтенсивністю теплової дії, яка дозволяє завдяки дозованому впливу пучка на зварювальну ванну локалізувати газові включення, організувати їх спрямоване примусове переміщення до зовнішньої поверхні рідкого металу і видалення з розплаву.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є узагальненням результатів, отриманих автором самостійно та у співавторстві. Постановка задач досліджень, обговорення результатів та формулювання основних висновків проведено спільно з науковим керівником. За безпосередньою участю автора проведений аналіз та узагальнення літературних даних про сучасний стан вимог до алюмінієвих сплавів. Детально вивчено галузь застосування цих матеріалів. За результатами аналізу були розроблені наукові та технологічні напрямки проведення роботи. В ході її виконання були детально вивчені закономірності пороутворення при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

Особисто автор приймав участь у виконанні процесу електронно-променевого зварювання, проведенні досліджень та аналізі отриманих результатів. Автор приймав активну участь в розробці, складанні та випробуваннях електронно-променевої гармати нового покоління. Автором виконувались дослідження отриманих зварних з'єднань. Визначені кореляційні залежності результатів, які отримані при зварюванні зразків традиційними методами та по запропонованому технологічному процесу між структурними характеристиками та механічними властивостями зварних швів.

Планування та безпосередня участь у проведенні експериментів із електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів. Дослідження структури зварних з'єднань методами електронної та оптичної мікроскопії.

Апробація результатів дисертації. За результатами дисертаційної роботи були представлені 9 доповідей, які доповідались і обговорювались на 9-ти міжнародних наукових конференціях, в тому числі: VIII-й міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 20-22 травня 2015 року, смт. Ворзель, Київська обл., Україна; Міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє», 5-6 грудня 2018 року, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ, Україна; Міжнародній конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2021», 27-28 травня 2021 року, м. Київ, Україна; «Технології та конструкції в космосі» доповідь на Круглому столі «Досягнення молодих учених України в розвитку ракетно-космічної галузі в умовах війни», 12 квітня 2023 р., Київ, Україна; 76-й Щорічній асамблеї Міжнародного Інституту Зварювання та Міжнародна конференція зі зварювання та з'єднання», 16 липня 2023 року, Сінгапур; Міжнародній конференції «СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ», 27 листопада 2023 року, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ, Україна; Міжнародній конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2023», 23-24 листопада 2023 року, м. Київ, Україна; «Young Welding Professionals International Conference» 8-9 February 2024; XXVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос», 17-19 квітня 2024 року, м. Дніпро, Україна.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, з них 4 – в періодичних виданнях, які реферуються в наукометричній базі Scopus; 1 – в виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань України; 9 – в збірниках праць науково-технічних конференцій, 4 – в інших галузевих виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків і списку літератури із 18 найменувань. Вона викладена на 143 сторінках тексту, що включає 9 таблиць та 78 рисунка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульована мета та завдання дослідження, предмет, об'єкт та методи дослідження, відзначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, подана інформація про особистий внесок здобувача, апробацію та публікацію результатів роботи.

У **першому розділі** показана доцільність виконання зварювання в космічних умовах. Доведено, що при подальшому освоєнні космічного простору і експлуатації літальних апаратів може виникати необхідність в проведенні монтажно-складальних операцій, або ремонтно-профілактичних роботах, пов'язаних із забезпеченням тривалості експлуатації діючих систем. В такому випадку зварювання є пріоритетним технологічним процесом, який дозволяє створювати надійні з'єднання елементів конструкцій з гарантованою герметичністю без зниження їх міцності і збереження масогабаритних характеристик. Із усіх існуючих видів зварювальних процесів на основі багаторазового випробування в космічних умовах на борту станцій та у відкритому космосі визначено, що саме ЕПЗ є найбільш придатним для використання в умовах високого космічного вакууму, низької гравітації та різкої зміни температур.

Розглянуті особливості фізичних умов відкритого космосу такі, як невагомість, космічний вакуум, наявність різких світлотіньових границь, мікрогравітація та інші фактори космічного середовища.

Проведено узагальнення літературних даних та попереднього досвіду у розробці, виготовленню та випробуванню обладнання для проведення зварювання в космічних умовах. Вивчений вплив фізичних умов відкритого космосу на проведення технологічного процесу зварювання алюмінієвих сплавів. Показано, що при виконанні ЕПЗ в умовах надвисокого вакууму, зниженої гравітації та низьких температур цей процес ускладнюється, і, відповідно, якість зварних з'єднань може знизитися. Аналіз результатів проведених експериментів в космічних умовах, а також на літаючій лабораторії, показав підвищену кількість пор в зварних швах. Це, у першу чергу, виявилось при зварюванні зразків із алюмінієвих сплавів, які широко використовуються для створення конструкцій космічного призначення.

На підставі результатів патентних та літературних досліджень, зроблений висновок необхідності проведення керування процесом кристалізації металу і створення умов для більш інтенсивного спливання бульбашок з газом або з парами металу. Для цього необхідно проводити термообробку до і після зварювання.

Проаналізовано досвід використання зварювальних процесів в космосі та розглянуто конструкції обладнання попередніх поколінь, яке пройшло випробування в космічних умовах, його позитивні сторони та недоліки. 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. В 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.

Тому однією з цілей цієї роботи є створення обладнання нового покоління, яке дозволить вирішити вказані вище проблеми, та розробка сучасного технологічного процесу. Створене обладнання повинно мати підвищену потужність і систему гострого фокусування. Це дозволить вирішити проблему підвищеного утворення пор в зварних швах із алюмінієвих сплавів і одержати якісні з'єднання завтовшки до 6...8 мм. Крім того, обладнання нового покоління дозволить створити сучасну технологію електронно-променевого зварювання з можливістю керування процесом кристалізації металу і більш інтенсивного спливання бульбашок з газом або з парами металу та проводити термообробку до і після зварювання.

На основі проведеного аналізу літературних джерел сформульована мета роботи, яка полягає у створенні принципового технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів, що дозволяє в умовах зниженої гравітації одержувати якісні зварні з'єднання, які відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення з використанням обладнання нового покоління.

У відповідності до поставленої мети були визначені задачі досліджень.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено вивченню механізму пороутворення при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

З метою запобігання надлишкової пористості в зварних з'єднаннях створена спрощена математична модель процесу, яка дозволила провести оцінку схильності до пороутворення металу зварного з'єднання, одержаного кинджальним проплавленням за допомогою висококонцентрованого джерела зварювального нагрівання. Для цього на основі припущень умов гідростатичного балансу ПГК проведений якісний аналіз основних факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор в зварних швах при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

Показано, що ця проблема певною мірою посилюється при реалізації режиму зварювання, який супроводжується формуванням ПГК. При цьому прийнято виділяти два основні механізми формування пористості металу шва, а саме:

- пухирці домішкових газів (насамперед, водню), які сформувалися в розплаві, але не встигли вийти на поверхню зварювальної ванни і закристалізувалися в ній у вигляді пор;
- нерівномірне по висоті схлопування ПГК, яке призводить до захоплення навколишньої атмосфери та формування нещільностей металу шва.

Оскільки метою даного розділу є якісна оцінка впливу сили гравітації на схильність металу зварного шва до зародження дефектів типу газових пор, які характерні при зварюванні висококонцентрованими джерелами нагрівання, тому для побудови математичних моделей було прийнято низку припущень, а саме:

- висока концентрація джерела зварювального нагрівання, що є необхідною умовою формування ПГК;
- режим стаціонарного ПГК (який характеризується невеликими значеннями числа Пекле), коли форма каналу може бути прийнята циліндричною або конічною (див. рис. 1);
- гідродинаміка зварювальної ванни характеризується невеликими числами Рейнольдса.

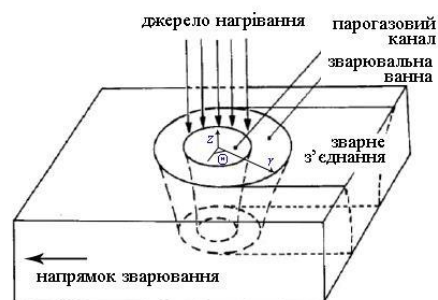


Рисунок 1 – Умовна схема зварювання зі стаціонарним парогазовим каналом

Виходячи з викладених припущень, умова рівноваги ПГК може бути описана виходячи з наступного співвідношення гідростатичного балансу:

$$p_a + p_g = p_d + p_h + p_\gamma, \quad (1)$$

де p_a – абляційний тиск, викликаний речовиною в процесі її випаровування з поверхні поділу фаз; p_g – тиск пари в ПГК; p_d – гідростатичний тиск; p_h – гідродинамічний тиск; p_γ – поверхневий натяг.

Розрахунковими методами встановлено, що умова (1) встановлює рівновагу між сумарною дією абляційного тиску та тиску пари, які розширюють ПГК, та гідростатичного, гідродинамічного тиску, а також поверхневого натягу, спрямованих на зхлопування ПГК.

Іншим механізмом пороутворення в металі зварного з'єднання є кристалізація металу разом із пухирцями домішкових газів, які не досягли поверхні розплаву за час існування рідкої зварювальної ванни.

Для визначення впливу зниженої гравітації на розплавлену ванну при ЕПЗ було обрано технологічний процес стикового електронно-променевого зварювання пластин з алюмінієвого сплаву 5456 завтовшки $t = 5$ мм, приймалася можливість зміни прискорення вільного падіння від 0 до 9.81 м/с^2 .

З точки зору гідростатичного балансу (1) вплив гравітації на стабільність ПГК проявляється у досить вузькому діапазоні технологічних параметрів, що обумовлено невеликим вкладом гідростатичного тиску в сумарний баланс тисків: Зниження сили гравітації та відповідне зменшення гідростатичного тиску має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, викликаних локальним схлопуванням каналу в процесі зварювання

Іншим механізмом пороутворення в металі зварного з'єднання є кристалізація металу разом із пухирцями домішкових газів, які не досягли поверхні розплаву за час існування рідкої зварювальної ванни. Характеристикою схильності до появи несучільностей в залежності від сили гравітації може служити швидкість спливання пухирців певного радіусу, яка оцінена рівнянням Гадамарда-Рибчинського, що є частинним розв'язком рівняння Нав'є-Стокса за умови невеликих значень числа Рейнольдса розплаву, що розглядається:

$$V_b = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2 \cdot (\rho_f - \rho_g)}{\mu_f} \cdot \frac{\mu_f + \mu_g}{2 \cdot \mu_f + 3 \cdot \mu_g}, \quad (2)$$

де r – радіус пухирця газу; ρ_f, ρ_g – щільність рідини та газу, відповідно; μ_f, μ_g – динамічна в'язкість рідини та газу, відповідно.

Як видно з формули (2), швидкість спливання пропорційна прискоренню вільного падіння, тому зниження гравітації буде призводити до зменшення швидкості спливання пухирців газу і підвищення схильності пороутворення в металі зварного з'єднання. Також, суттєвим показником є радіус пухирця газу, що зародився, квадрат значення якого входить в формулу (2). Це означає, що при зниженні гравітації, з одного боку, збільшуватиметься концентрація пор у металі шва, з іншого – зростатимуть розміри окремих пор, і навпаки, при збільшенні прискорення вільного падіння пори будуть відсутні (рис. 2).



Рисунок 2. – Макрошліф поверхневого зрізу зразка стикового з'єднання зі сплаву 5456, одержаного за один прохід електронно-променевим зварюванням на літаючій лабораторії в режимі перевантаження з прискоренням $2g$ і в режимі зниженого прискорення $1/6g$ (поверхня Місяця)

Крім того, моделювання руху газових пухирців у зварювальній ванні показує (рис. 3,а), що при певних параметрах зварювання вони не встигають спливати, і можуть захоплюватися зубчастим фронтом кристалізації, викликаючи утворення пор у зварних швах.

Однак, параметрами процесу зварювання можна створювати такі умови, при яких газовий пухирець виходить на вільну поверхню рідкої ванни і залишає її. Пори при цьому в металі шва не утворюються (рис. 3б).

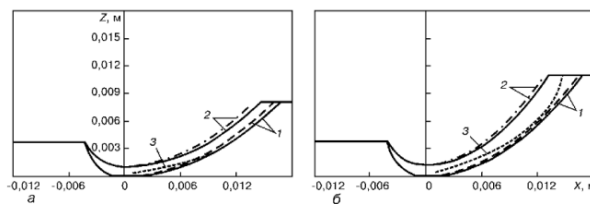


Рисунок 3 (а, б) – Результати розрахунку траєкторії газового пухирця ($r_0=0,3\text{мм}$):

1 – фронт кристалізації у вихідному положенні (суцільна крива) та після переміщення за час t (штрихова); 2 – границя ванни (суцільна і штрихова ті самі, що й в кривій 1); 3 – траєкторія пухирця

Таким чином, розрахунки за запропонованою математичною моделлю показали, що траєкторія газового пухирця може перетинатися з рухомих зубчастим фронтом кристалізації ванни або виходити на вільну поверхню. У першому випадку пори виникають в середній частині шва, а в другому – не утворюються.

Така модель дозволяє оцінити вплив різних параметрів процесу електронно-променевого зварювання на ймовірність утворення пор і намітити заходи боротьби з ними.

У **третьому розділі** описано розробку конструкції електронно-променевого обладнання нового покоління.

На основі проведених теплових досліджень була запропонована концепція створити новий електронно-променевий інструмент, який містить електронно-променеву гармату, що з'єднується з джерелом живлення за допомогою високовольтного гнучкого кабелю з роз'ємом і матиме можливість формувати гострофокусний пучок діаметром не більше 1 мм в фокальній площині на відстані до 80 мм, що дасть змогу оператору виконувати технологічні процеси без надмірних зусиль і забезпечить зручне спостереження за ними при достатній відстані від місця об'єкту.

Нова гармата дозволяє споживати менший струм (5...10 А) у накальній мережі для підігріву лантанборидного катоду порівняно з діодними прямонакальними гарматами, які неможливо підключити до джерела живлення гнучким кабелем з малим перетином з причини великого струму (18...20 А) для безпосереднього нагрівання катоду.

Вихідні дані нової гармати для використання в умовах Місяця мають наступні значення:

1. Прискорювальна напругадо 10 кВ;
2. Струм пучка0... 250 мА;
3. Тип емісійної системитріодна;
4. Напруга запирання0.....2,0 кВ;
5. Конструкція катодного вузлашвидкозмінний;
6. Спосіб підігріву катодуелектронне бомбардування;
7. Напруга електронного бомбардування.....80.....1200 В;
8. Струм електронного бомбардування0...100 мА;
9. Напруга розжарення підігрівача2...5 В;
10. Струм розжарення підігрівача.....до 10 А;
11. Матеріал катодуLaB₆, Та, W;
12. Фокусуванняелектростатичне, довгофокусне;
13. Діаметр фокусадо 1,0 мм;
14. Робоча відстаньдо 85 мм;
15. Матеріал ізоляторів.....Al₂O₃;
16. Габарити гарматидовжина: не більше – 250 мм;
діаметр: не більше – 80 мм;
17. Маса2,5 кг;

18. Ресурс роботи катодадо 40 годин;
19. Час заміни швидкозмінного катодного вузладо 3,5 хвилин;
20. Час безперервної роботи гармати (при включеному накали катоду) до 10 хвилин;
21. Час охолодження гармати між включеннями накалу катода до 15 хвилин.

На відміну від раніше використовуваних гармат з діодними емісійними системами та прямонакальними катодами нова гармата, схема якої наведена на рисунку 4, оснащена тріодною емісійною системою з катодом типу таблетки (із гексабориду лантану або танталу), який підігрівається електронним бомбардуванням, а безінерційне керування струмом пучка відбувається зміною керуючої напруги на фокусує чому електроді.

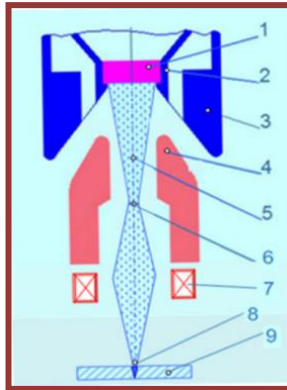


Рисунок 4 – Нова довгофокусна тріодна емісійна система електронно-променевої гармати, $U_{пр.} = 10$ кВ, $I_w = 250$ мА: 1 – катод LaB6; 2 – катодотримач; 3 – керуючий електрод; 4 – анод; 5 – електронний пучок; 6 – кросовер; 7 – електромагнітна лінза; 8 – сфокусований пучок; 9 – зварювальний зразок

На рисунку 5 показаний повздовжній перетин (А - А) тріодної електронно-променевої гармати з електростатичним фокусуванням для технологічних робіт в космосі в складі маніпулятора або робота.

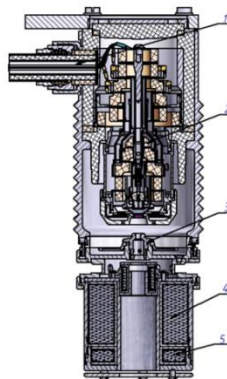


Рисунок 5 – Повздовжній перетин (А-А) тріодної електронно-променевої гармати з електромагнітним фокусуванням і системою періодичного відхилення пучка: 1 – високовольтний ввід; 2 – катодний блок; 3 – анодний блок; 4 – електромагнітна фокусуєча система; 5 – відхиляюча система

Нова гармата дозволяє споживати менший струм (5...10 А) у накульній мережі для підігріву лантанборидного катода порівняно з діодними прямонакальними гарматами, які неможливо підключити до джерела живлення гнучким кабелем з малим перетином з причини великого струму (18...20 А) для безпосереднього нагрівання катода.

Відповідно до прийнятої концепції була створена технічна документація на електронно-променеву гармату для зварювання на поверхні Місяця. Гармата нового покоління спроможна також працювати, як в ручному (при виконанні робіт космонавтом-зварником), так і в автоматичному варіанті у складі роботи або штучного інтелекту. При роботі в космічних умовах виникають ситуації, при яких необхідна участь космонавта-зварювальника, наприклад для оцінки масштабів аварійної ситуації та методів її ліквідації виникає необхідність виконувати такі роботи ручним інструментом.

На рисунку 6 показаний загальний вигляд створеного ручного електрино-променевого інструменту для виконання технологічних робіт в космічних умовах.



Рисунок 6 – Загальний вигляд розробленого ручного електронно-променевого інструменту

Досягнуті значення питомої потужності пучка дозволяють виконувати зварювання в космосі алюмінієвих сплавів товщиною до 6 мм, титанових сплавів, а також неіржавіючих сталей товщиною до 4 мм, що практично охоплює всі матеріали та їх товщини, які застосовуються в космічному апаратобудуванні.

При розробці конструкції нової гармати були враховані потреби забезпечення мінімальної маси гармати та високої надійності її роботи в умовах, коли температура окремих тепло навантажених вузлів конструкції, зокрема катода та електронного підігрівача, досягають 1800 °С, а електрична ізоляція цих вузлів від корпусу гармати повинна витримувати прикладену робочу прискорену напругу 10 кВ. Крім того, в тріодній емісійній системі між катодом і фокусуючим електродом також прикладається керуюча напруга до 4 кВ. При цьому гармата при роботі у космічному вакуумі повинна надійно функціонувати без застосування традиційної рідинної системи охолодження. До того ж, в умовах роботи у відкритому космосі зовнішня поверхня гармати може додатково підігріватися інтенсивним сонячним випромінюванням.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений розробці елементів технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів в умовах космосу на обладнанні нового покоління, яке було розроблено та виготовлено, а також проведенню досліджень механічних властивостей та структур металу шва зварних з'єднань зразків.

Для розробки технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів і одержання якісних зварних з'єднань, розроблена спеціалізована електронно-променева гармата нового покоління, яка описана у розділі 3.

Створена електронно-променева гармата укомплектована електромагнітною фокусувальною і відхиляючою системами електронного променя з програмованим періодичним відхиленням електронного пучка і заданою інтенсивністю нагріву по траєкторії скануючого пучка, що дозволяє виконувати інтенсивне перемішування розплавленого металу зварювальної ванни і одержувати якісні, бездефектні зварні з'єднання.

Наявність обладнання нового покоління дозволяє розробити однопрохідний процес з однією зварювальною ванною і попередньою та наступною термообробкою шва з перемішуванням

розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою електронного пучка і програмованою тепловою інтенсивністю в кожній зоні технологічного процесу.

Для виконання технологічного процесу стенд ОБ1469м був оснащений: системою періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагрівання і варіантами видів розгорток; маніпулятором для переміщення електронно-променевої гармати; столом для кріплення зварювальних зразків та водоохолоджувальною мідною мішенню для перевірки і встановлення струму пучка і струму фокусування.

Живлення електронно-променевої гармати здійснювали лабораторним джерелом ІУН - 5 з прискореною напругою 10 кВ.

Для керування відхиленням електронного променя по заданій траєкторії і програмованого тепловкладення з різною інтенсивністю нагрівання в процесі зварювання або різання, використовували систему ВС-5, розроблену і виготовлену для виконання цих робіт.

Для розробки цього пристрою була використана система проектування "SVscan", завдяки якій можна створити рисунок траєкторії (апроксимувати) розгортки з використанням різної кількості точок (з можливістю їх розширення), що дозволяє системі періодичного відхилення електронного пучка реалізувати частоту сканування від 100 Гц до 1000 Гц. У цієї системи є можливість оцінювати інтенсивність нагріву в будь-якій точці поверхні та переглядати в 3D зображенні результуючий розподіл щільності потужності електронного пучка в зоні нагріву в динаміці при зміні частоти сканування.

Для дослідження запропонованого способу було проведено моделювання з використанням процесів термообробки зі зварюванням за один прохід, який проводиться розщепленням електронного пучка на необхідну кількість зон впливу (дві або три) при великій частоті сканування, що дозволяє електронному пучку впливати на різні зони, та проводити інтенсивне переміщення у шві. Це повинно сприяти спливанню бульбашок із середини металу шву на його поверхню, та залишати її зовсім.

Було випробувано 47 «вузлів» з частотою розгортки 180 Гц. При цьому діаметр реверсної кругової розгортки, що зварює, становить 2 мм, а діаметр сфокусованої плями електронного пучка 0,8 мм. Відносна швидкість переміщення зони нагріву складе $\sim 0,4$ м/хв. Цей варіант розгортки з попереднім підігрівом та наступною термообробкою з різними тепловими впливами відносно дії амплітуди зварювального пучка представлений на рисунку 7.

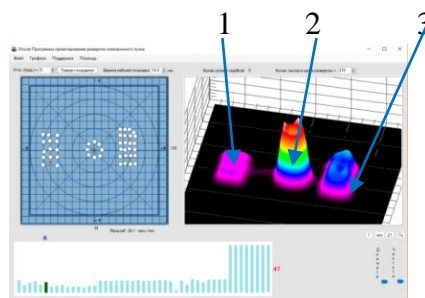


Рисунок 7 - Розгортка з періодичним відхиленням електронного пучка і попередньою та подальшою термічною обробкою шва (1 - попередня термічна обробка, 2 - зварювання круговою реверсною розгорткою, 3 - подальша термічна обробка);

Електронним променем проводилось сканування вздовж всього шва і виконувалось зварювання з переміщенням розплавленої ванни реверсною круговою розгорткою діаметром 2,0 мм. Хвостова частина ванни при цьому підігрівалась впродовж всього процесу зварювання. Бульбашки, які утворювалися у хвостовій частині, встигали вийти на поверхню і залишити її.


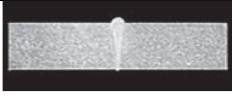



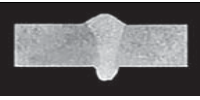


Особливо важливо, що при цьому значення струму фокусування залишалося незмінним при відхиленні пучка в режимах попередньої і наступної термообробки.

Поєднання зварювального процесу, попередньої та наступної термообробки призводить до збільшення часу циклу роботи розгортки та зменшенню частоти сканування електронного пучка, що необхідно враховувати при проектуванні розгортки.

Для технологічних випробувань використовувалися зразки стикових з'єднань з відбортунням крайків із алюмінієвих сплавів 5456 і 2219, які застосовуються як основний конструкційний матеріал космічної техніки.

Рентгенограми та макрошліфи зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів, одержані електронно-променевим зварюванням з періодичним відхиленням електронного пучка показані в таблиці 1.

Таблиця 1. Рентгенограми та макрошліфи зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів.

| № пп. | Сплав | Тов., мм | Рентгенограма | Макрошліф |
|-------|------------------------|----------|--|---|
| 1 | 5456 без сканув. | 6,0 |  |  |
| 2 | 5456 з період. відхил. | 6,0 |  |  |
| 3 | 5456 з період. відхил | 4,0 |  |  |
| 4 | 2219 з період. відхил. | 5,0 |  |  |

Аналіз контрольних зображень ЗЗ статичним електронним пучком без сканування в процесі зварювання показав наявність пор розміром від 0,3 до 1,0 мм. А в з'єднаннях, одержаних з періодичним відхиленням, внутрішніх дефектів не виявлено.

Металографічними дослідженнями було виявлено, що щільна структура металу шва (МШ) спостерігається в основному об'ємі. Структура шва дендритна, дендритний параметр по висоті шва суттєво не змінюється. Тобто структура МШ стабільна по об'єму. Спостерігаються одиничні пори в корені шва розміром до 30 мкм. В зоні сплавлення та зоні термічного впливу (ЗТВ) наявні дрібні пори розміром до 40 мкм. Причому пори спостерігаються на глибину до 1000 мкм від лінії сплавлення в зварюваний метал. Така картина характерна для всіх ЗЗ сплаву 2219, отриманих зварюванням плавленням, незалежно від способу. Дефектів у вигляді тріщин не виявлено.

Аналіз елементного складу в ЗЗ, одержаних ЕПЗ з періодичним відхиленням електронного пучка, показав рівномірний розподіл всіх елементів від основного металу до металу шва.

Дослідження механічних властивостей основного металу та зварних з'єднань алюмінієвих сплавів 5456 та 2219 при кімнатній, підвищеній та криогенній температурах

Випробування проводили на універсальному сервогідролічному випробувальному комплексі MTS 318.25 (США, Material Test System) з максимальним зусиллям 250 кН. Даний комплекс забезпечує жорстке навантаження зразка, що особливо актуально при визначенні модуля пружності та границі текучості.

За результатами випробувань на одновісний розтяг зразків за кімнатної температури значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456 та 2219.

Таблиця 2. Результати випробувань на одновісний розтяг зразків за кімнатної температури

| Характеристики механічних властивостей | | | |
|--|--|-----------------------------------|---|
| Середні значення | Границя текучості $\sigma_{0.2}$, МПа | Границя міцності σ_e , МПа | Відносне видовження зразка δ , % |
| основний метал 5456 | 177 | 357 | 26.2 |
| зварні з'єднання 5456 | 184 | 329 | 14.9 |
| основний метал 2219 | 339 | 434 | 18.4 |
| зварні з'єднання 2219 | 295 | 399 | 10.05 |

Для проведення досліджень на розтяг при підвищеній температурі +120 °С використовували високотемпературну систему нагріву SEO 001/12/18. Дана система нагріву конструктивно виконана у вигляді окремого блоку управління та електропечі, як приставки до основного комплексу випробувального обладнання.

Для нагрівання та підтримки під час випробувань заданої температури зразка застосовують блок управління, у якому використано широтно-імпульсний метод регулювання температури.

Таблиця 3 – Значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456 та 2219 за результатами випробувань на одновісний розтяг зразків при підвищеній температурі +120 °С

| Характеристики механічних властивостей | | | |
|--|--|-----------------------------------|---|
| Середні значення | Границя текучості $\sigma_{0.2}$, МПа | Границя міцності σ_e , МПа | Відносне видовження зразка δ , % |
| основний метал 5456 | 177 | 298 | 44.6 |
| зварні з'єднання 5456 | 178 | 291 | 36.3 |
| основний метал 2219 | 299 | 369 | 18.7 |
| зварні з'єднання 2219 | 287 | 365 | 7.7 |

Для реалізації випробувань на одновісний розтяг (ДСТУ 7305:2013) зразків із алюмінієвих сплавів та їх зварних з'єднань за пониженої температури -180°С також було використано універсальний сервогідравлічний випробувальний комплекс MTS 318.25.

Виготовлений кріостат забезпечує охолодження зразка до температури -180°С та надає можливість підтримання сталої заданої температури під час випробування. Як охолоджувач використовується рідкий азот. Виготовлене устаткування забезпечує рівномірне охолодження робочої частини зразка з градієнтом температури не більше $\pm 2^\circ\text{C}$, що відслідковується встановленими на робочій частині зразка двома термоелектричними перетворювачами (термопарами). Тривалість витримування зразка в охолоджувачі складає не менше 10 хв після закінчення бурхливого кипіння рідкого азоту. Швидкісний режим випробування відповідав вимогам стандарту ДСТУ 7305:2013.

Таблиця 4 – Значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456 та 2219 за результатами випробувань на одновісний розтяг зразків при кріогенній температурі -180 °С

| Характеристики механічних властивостей | | | |
|--|--|-----------------------------------|---|
| Середні значення | Границя текучості $\sigma_{0.2}$, МПа | Границя міцності σ_e , МПа | Відносне видовження зразка δ , % |
| основний метал 5456 | 196 | 425 | 30.8 |
| зварні з'єднання 5456 | 207 | 364 | 14.5 |
| основний метал 2219 | 453 | 497 | 19.7 |
| зварні з'єднання 2219 | 308 | 434 | 13.45 |

На графіках, приведених на рисунку 8, представлено порівняння механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань.

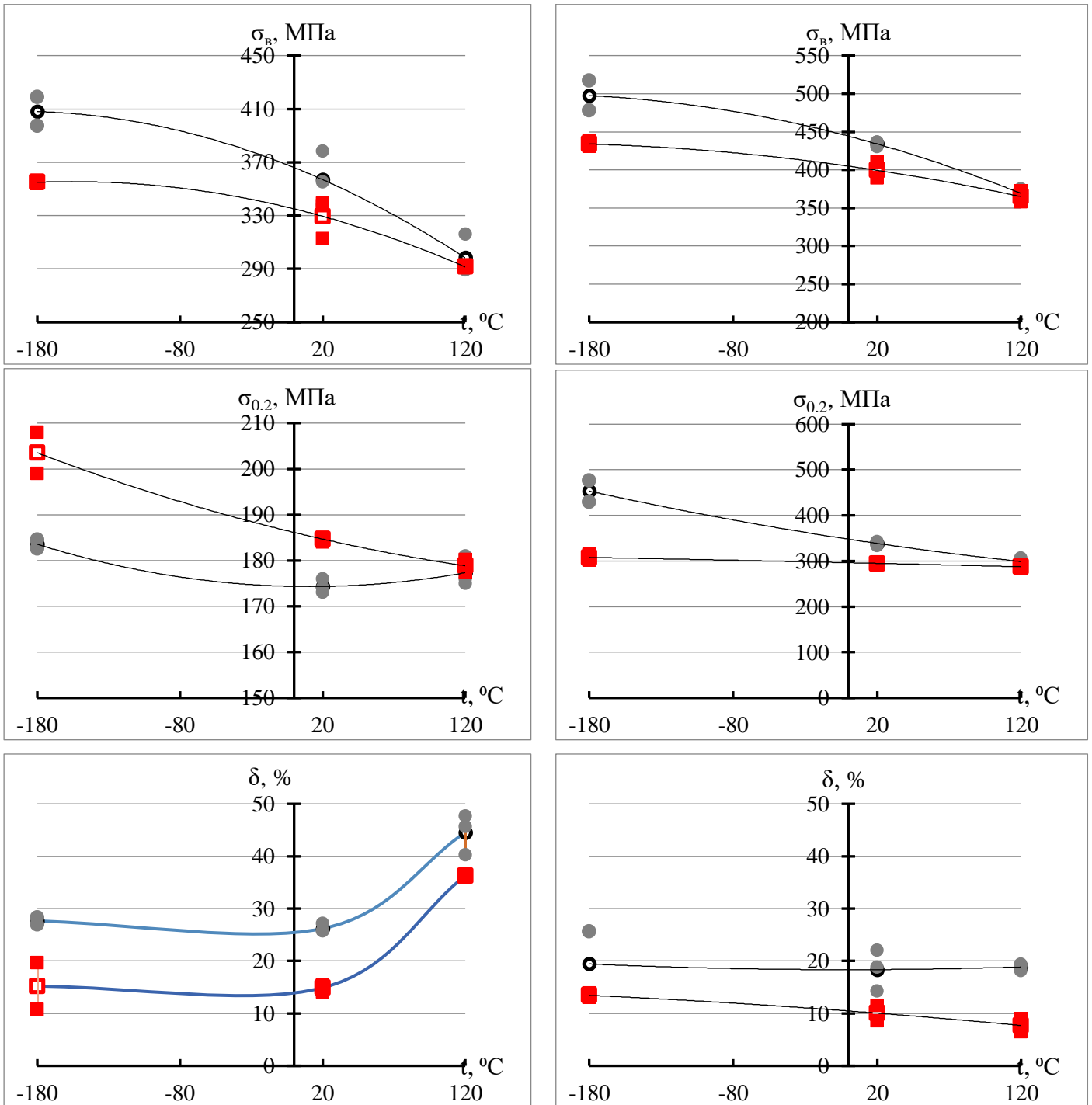


Рисунок 8 - Порівняння механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань
 а) алюмінієвого сплаву **5456** б) алюмінієвого сплаву **2219**

На графіках, приведених на рисунку 8а, можна спостерігати, що значення межі міцності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456 лише на 3-13% нижчі відповідних показників основного металу, при цьому при збільшенні температури випробувань різниця зменшується.

Показники умовної границі текучості для зварних з'єднань перевищують на 1-10% відповідні показники основного металу. Це може пояснюватися тим що база визначення умовної границі текучості для зварних з'єднань включала, як основний метал так і зони термічного впливу та метал шва, що мають відмінну мікроструктуру металу від основного металу.

Показники відносного видовження після розриву для зварних з'єднань складають близько 50% в діапазоні температур -180 °С...+20 °С та підвищуються до 80% для температури +120°С.

На графіках, приведених на 8б, видно, що значення межі міцності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219 лише на 2-13% нижчі відповідних показників основного металу, при цьому при збільшенні температури випробувань різниця зменшується.

Показники умовної границя текучості для зварних з'єднань лише на 4-13% відповідні показники основного металу в діапазоні температур 20°C...120°C, проти при криогенній температурі -180°C різниця досягає 33%.

Показники відносного видовження після розриву для зварних з'єднань складають близько 40...69% в діапазоні температур -180°C...+120°C, з характерним збільшення розбіжності при підвищенні температури випробувань.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сукупність теоретичних положень та практичних розробок, викладених у цій роботі, може бути кваліфікована як вирішення важливого науково-технічного завдання створення принципового технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів, який дозволяє з використанням обладнання нового покоління в умовах зниженої гравітації одержувати якісні зварні з'єднання, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення.

1. За допомогою обчислювального експерименту було встановлено закономірності утворення пор в металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несущільностей такого типу.

2. Встановлено, що найбільший вплив на стійкість ПГК надає співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу, які несуттєво залежать від сили гравітації. В свою чергу, гідростатичний тиск знижується при зменшенні сили гравітації, що має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, зумовлених локальним схлопуванням каналу в процесі зварювання.

3. Вперше визначено суттєвий вплив сили гравітації та розмірів пухирців газу на швидкість їх спливання з розплаву. Показано, що при зниженні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с² різко збільшується розмір пухирців газу, які не встигають спливати до повної кристалізації ванни розплаву і формують сферичну несущільність металу шва.

4. Вперше створена електронно-променева гармата, яка для робіт в умовах високого космічного вакууму використовує тріодну емісійну систему, що при прискорювальній напрузі 10 кВ потужністю 2,5 кВт, спроможна виконувати зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм, які, в основному, застосовують в сучасному космічному апаратобудуванні.

5. Вперше розроблена, виготовлена та випробувана електронно-променева гармата, яка має можливість фокусування електронного променя та періодичного відхилення програмованої інтенсивності нагріву електронним променем по заданій траєкторії, а її оптична система формує гострий електронний пучок (діаметром не більше 1,0 мм) на відстані 50...150 мм, що дозволяє одержувати якісні, бездефектні зварні з'єднання.

6. Вперше запропонована принципова технологія електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів однопрохідним способом з попереднім підігрівом та наступною термообробкою шва з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою і періодичним відхиленням електронного пучка, яка завдяки дозованому впливу променя на зварювальну ванну дозволяє локалізувати газові включення, організувати їх спрямоване примусове переміщення до зовнішньої поверхні рідкого металу і видалення з розплаву.

**ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНІ В
НАСТУПНИХ ПУБЛІКАЦІЯХ**

1. Lobanov L.M., Asnis E.A., Ternovoy Ye.G., Zubchenko Yu.V., Statkevich I.I., Volkov V.S., Glushak S.A. Some Issues of Repairing Manned Space Vehicles in Outer Space Using Electron Beam Welding. State Phenomena Submitted: 2020-07-07 ISSN: 1662-9779.

Vol. 315. P.101-105. URL:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.315.101>.

2. Глушак С.О. Еволюція електронно-променевого обладнання для зварювання у космосі. Автоматичне зварювання. 2023 № 8. С. 1-7.

3. Лобанов Л.М., Міленін О.С., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Глушак С.О., Статкевич І.І., Радченко Л.М. Закономірності пороутворення при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації. Космічна наука технологія. 2023. Т. 29. № 3. С. 57-66 .URL:<https://doi.org/10.15407/knit2023.03.057>.

4. Лобанов Л.М., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Глушак С.О., Крюков В.А., Харківська Т.М., Статкевич І.І., Шулим В.Ф., Закорко В.О. Електронно-променева гармата для ручного електронно-променевого зварювання в умовах поверхні Місяця. Косм. наука і технол. 2024. 30(1):80-91.URL: <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.080>.

5. Лобанов Л.М., Ланкін Ю.Н., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Глушак С.О., Соловійов В.Г., Семікін В.Ф., Федорчук В.Є., Статкевич І.І. Елементи технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів для монтажних і ремонтно-відновлюваних робіт на поверхні Місяця. Косм. наука технол. 2024. 30(2):40-53 URL:<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.040>.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на конференціях:

1. Применение электронно-лучевой сварки для ремонта корпуса пилотируемой космической станции в космосе. Зварювання та споріднені технології: тези доп. на VIII міжнар. конф. молодих вчених та спеціалістів, смт. Ворзель, Київська обл., Україна, 20-22 трав., 2015р.. С.43.

2. Піскун Н.В., Вржижевський Е.Л., Глушак С.О., Таранова Т.Г., Статкевич І.І., Електронно-променеве зварювання інтерметаліду на основі алюмініду титану. Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє: тези доп. на міжнар. конф., м.Київ, Україна, 5-6 грудня. 2018 р., ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м.Київ, Україна. С. 25-26.

3. Лобанов Л.М., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Квасницький В.Ф., Квасницький В.В., Глушак С.О., Статкевич І.І., Булацев О.Р., Шулим В.Ф., Крюков В.А..

Нове покоління ручного електронно-променевого інструменту для технологічних робіт у відкритому космосі. Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах: тези доп. на міжнар. конф. PolyWeld 2021, м. Київ, Україна, 27-28 трав. 2021 р. С. 69-71

<https://polyweld.kpi.ua/PolyWeld2019>

4. Технології та конструкції в космосі. Досягнення молодих вчених України в розвитку ракетно-космічної галузі в умовах війни: круглий стіл, м. Київ, 12 квіт.2023р.

<https://mon.gov.ua/ua/news/rozvitok-raketno-kosmichnoyi-galuzi-vidbuvsya-kruglij-stil-molodih-uchenih>

5. L.M. Lobanov, S.O. Hlushak, Y.N. Ternovyi, N.V. Piskun, V.A. Kriukov, T.M. Kharkivska, I.I. Statkevych. Hand-held electron beam tool for technological work in outer space. 76-а Щорічна асамблея Міжнародного Інституту Зварювання та Міжнародна конференція зі зварювання та з'єднання, 16 липня 2023 р., Сінгапур. <https://iiw2023.com/commissions-agenda/>

6. Піскун Н.В., Терновий Є.Г., Глушак С.О., Крюков В.А., Статкевич І.І., Шулим В.Ф., Закорко В.О.. Розробка обладнання для електронно-променевої багатопарової наплавки 3D при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт в умовах космічного вакууму. Сучасні напрями розвитку адитивних технологій: тези доп. конф., м. Київ, 27 лист. 2023 р., ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ, Україна. С.34.

7. Піскун Н.В., Терновий Є.Г., Глушак С.О., Міленін О.С., Статкевич І.І., Крюков В.А., Харківська Т.М.. Особливості обладнання і технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів в космічних умовах. Інноваційні технології та інжиніринг у

зварюванні і споріднених процесах: тези доп. на міжнар. конф. PolyWeld 2023, м. Київ, 23-24 лист.2023р., С.12- 15. <https://polyweld.kpi.ua/PolyWeld2023>

8. S.O. Hlushak, L.M. Lobanov, Y.H. Ternovyi, N.V. Piskun, V.F. Shulym, V.A. Kriukov, I.I. Statkevych. Modern methods of combating pore formation during electron beam welding of aluminum alloys in conditions of reduced gravity: тези доп. на міжнар.конф.

«Young Welding Professionals International Conference» 8-9 February 2024.

9. Пискун Н.В., Терновий Є.Г., Глушак С.О.. Обладнання для ручного та автоматичного електронно-променевого зварювання при проведенні монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця: тези доп. на XXVI Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і Космос», м. Дніпро, Україна, 17-19 квіт. 2024 р.

Заявки на патент

1. Спосіб забезпечення високого робочого вакууму в електронно-променевої гарматі та пристрій для здійснення зварювання і споріднених технологій у відкритому космосі: пат.121773 Україна: В23К 15/00, В64G 4/00. № а 2017 12348; заяв. 13.12.2017; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 14.

2. Спосіб формування електронного пучка електронно-променевої гарматі для зварювання та споріднених технологій в умовах відкритого космосу: пат. 117397 Україна: В23К 15/00, В64G 4/00. № а 2016 10294; заяв. 10.10.2016; опубл. 25.07.2018, Бюл.№14.

3. Спосіб одержання кільцевих стикових з'єднань зварних конструкцій в умовах відкритого космосу: пат. 127958 Україна: В23К 15/00, 15/04/ №а 2021 03759; заяв. 01.07.2021; опубл. 21.02.2024, Бюл. №8.

4. Спосіб визначення температурних полів при зварюванні: заявка на винахід № а 2022 00087, заявл.10.01.2022, опубл. 12.07.2023, Бюл.28 (на кваліфікаційній експертизі).

АНОТАЦІЯ

Глушак С.О. Розробка обладнання та технології для електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів в умовах космосу.

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06. «Зварювання та споріднені процеси і технології»

(13 – Механічна інженерія). – Інститут Електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2024.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної задачі: створенню принципової технології електронно-променевого зварювання в умовах космосу та на поверхні Місяця для застосування її при виконанні ремонтних та ремонтно-відновлювальних робіт.

Задачу вирішено шляхом встановлення закономірностей пороутворення при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації та аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несущільностей такого типу, а також за допомогою обладнання нового покоління, яке дозволяє виконувати процес однопрохідним способом з попереднім підігрівом та наступною термообробкою шва з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою і періодичним скануванням електронного пучка та зварювати алюмінієві сплави товщиною до 6 мм, які в основному застосовуються в сучасному ракетобудуванні.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки нових наукових підходів при створенні сучасного технологічного процесу електронно-променевого зварювання, який є перспективним при виконанні в умовах надвисокого вакууму, зниженої гравітації та низьких

температур ремонтних, ремонтно-відновлювальних, монтажних і будівельних робіт в космосі та на поверхні Місяця.

В роботі проведений детальний аналіз літературних джерел, в яких розглядаються питання проведення зварювальних робіт в космічних умовах з урахуванням фізичних особливостей космічного простору; проаналізована конструкція обладнання попереднього покоління, яке пройшло випробування в космічних умовах, його потужні сторони та недоліки. Розглянуто властивості алюмінієвих сплавів, які широко використовуються для створення конструкцій космічного призначення. Показано, що при проведенні експериментів в умовах зниженої гравітації та низьких температур в космосі, а також імітації цих особливостей космічного простору на літаючій лабораторії в зварних швах зварюваних зразків із алюмінієвих сплавів виявилась підвищена кількість пор.

Досліджено закономірності утворення пор в металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несущільностей такого типу. Вперше розрахунковими методами встановлено, що найбільший вплив на стійкість парогазового каналу та кристалізації бульбашок домішкових газів має співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу, які не суттєво залежать від сили гравітації, а гідростатичний тиск, у свою чергу, знижується при зменшенні сили гравітації, що має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, спричинених локальним схлопуванням каналу в процесі зварювання. Показано, що при зниженні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко зростає розмір бульбашок газу, які не встигнуть спливати до повної кристалізації розплаву ванни, і формують сферичну нещільність металу шва.

Проведені технологічні експерименти по електронно-променевому зварюванню зразків з алюмінієвих сплавів в умовах високого вакууму, які підтверджують підвищену схильність зварних швів до появи пористості. При проведенні електронно-променевого зварювання дослідних зразків був також застосований традиційний спосіб дегазації зварювальної ванни, перемішуванням розплавленого металу безперервним одностороннім скануванням електронного пучка з круговою розгорткою, який не сприяє повній дегазації зварювальної ванни, особливо при зварюванні алюмінієвих сплавів середніх і великих товщин.

Показано, що обладнання для зварювання в космічних умовах попереднього покоління дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1,5 мм. В той же час товщина матеріалу, який використовується при виготовленні оболонок пілотованих космічних апаратів, досягає 4...6 мм. Крім того, можливості наявного обладнання не дозволяють розробити сучасний технологічний процес, при якому за один прохід виконувати електронно-променеве зварювання та термообробку.

Для вирішення цих проблем розроблена нова конструкція електронно-променевої гармати потужністю 2,5 кВт з прискорюючою напругою 10 кВ для зварювання при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт в космічних умовах та на поверхні Місяця.

В роботі вперше для електронно-променевих гармат космічного призначення запропонована тріодна емісійна система, яка формує електронний пучок високої якості, достатньої для здійснення електронно-променевого зварювання різних металів товщиною 4-6 мм.

Завдяки фокусуючої та відхиляючої системам, гармата має можливість фокусування електронного променя та періодичного відхилення програмованої інтенсивності нагріву електронним променем по заданій траєкторії, що було використано при створенні сучасного технологічного процесу електронно-променевого зварювання.

Для реалізації запропонованого процесу розроблена і виготовлена відхиляюча система ВС-5, яка використовувалася для керування періодичним відхиленням електронного променя по заданій

траєкторії і програмованого тепловкладення з різною інтенсивністю нагрівання в процесі зварювання.

Випробувана сучасна технологія електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів з розподілом потужностей теплової дії електронного пучка, яка дозволяє синтезувати керування відхиленням електронного пучка для створення заданого температурного поля при ЕПЗ з одночасним попереднім підігрівом і подальшою термообробкою зварного шва з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою і періодичним відхиленням електронного пучка, яка дозволяє локалізувати газові вклучення, організувати їх спрямоване примусове переміщення до зовнішньої поверхні рідкого металу і видалення з розплаву, що надає нові можливості для створення конструкцій в космічних умовах та поверхні Місяця.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання (ЕПЗ), алюмінієві сплави, зварні з'єднання (ЗЗ), надвисокий вакуум, знижена гравітація, пороутворення, парогазовий канал (ПГК), довготривалі місячні бази (ДМБ), низькі температури, дефекти в швах, нещільності, пори, система періодичного відхилення електронного променя, розгортка, механічні властивості, елементний склад, макроструктура, мікроструктура.

ABSTRACT

Hlushak S.O. Development of equipment and technology for electron beam welding of aluminum alloys in space.

Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences by specialty 05.03.06. "Welding and related processes and technologies"

(13 - Mechanical engineering). - E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the solution of a scientific and applied problem: the creation of the principle technology of electron beam welding in the conditions of space and on the surface of the Moon for its application in the performance of repair and repair and restoration works.

The task was solved by establishing the patterns of pore formation during electron beam welding of aluminum alloys in conditions of reduced gravity and analyzing the main factors that determine the increased tendency to form discontinuities of this type, as well as by using new generation equipment that allows the process to be performed in a single-pass way with preheating and subsequent heat treatment of the seam with mixing of the molten metal of the bath by reverse circular scanning and periodic scanning of the electron beam and welding aluminum alloys up to 6 mm thick, which are mainly used in modern rocketry.

The relevance of the work is due to the need to develop new scientific approaches in the creation of a modern technological process of electron beam welding, which is promising when performing repair, repair and restoration, assembly and construction works in space and on the surface of the Moon in conditions of ultra-high vacuum, reduced gravity and low temperatures.

In the work, a detailed analysis of literary sources is carried out, in which the issue of conducting welding works in space conditions is considered, taking into account the physical features of outer space; analyzed the design of the equipment of the previous generation, which was tested in space conditions, its strengths and weaknesses. The properties of aluminum alloys, which are widely used to create space structures, are considered. It is shown that when conducting experiments in conditions of reduced gravity and low temperatures in space, as well as simulating these features of outer space on a flying laboratory, an increased number of pores was found in the welds of welded samples from aluminum alloys.

The regularities of the formation of pores in the weld metal of welded joints made of aluminum alloys during EBW in conditions of reduced gravity were studied by analyzing the main factors that determine the increased tendency to the formation of discontinuities of this type. For the first time, it was established by calculation methods that the greatest influence on the stability of the steam-gas channel (SGC) and the

crystallization of impurity gas bubbles has the ratio of ablation pressure and surface tension force, which do not significantly depend on the force of gravity, and the hydrostatic pressure, in turn, decreases with a decrease in the force of gravity, which has a small positive effect on the stability of SGC and reduces the tendency to the electron-beam welding of aluminum alloys with mixing of the welding bath by a scanning electron beam with a programmable discrete intensity of thermal action on the welding bath allows appearance of pores caused by local collapse of the channel during the welding process. It is shown that when the acceleration of free fall is reduced below 3 m/s^2 , the size of gas bubbles, which do not have time to float before the complete crystallization of the bath melt, increases sharply and forms a spherical leak in the weld metal.

Technological experiments were conducted on electron beam welding of aluminum alloy samples under high vacuum conditions, which confirm the increased susceptibility of welds to the appearance of porosity. When conducting electron beam welding of experimental samples, the traditional method of degassing the weld pool was also used, mixing the molten metal with continuous one-sided scanning of the electron beam with a circular sweep, which does not contribute to complete degassing of the weld pool, especially when welding aluminum alloys of medium and large thicknesses.

It is shown that the equipment for welding in space conditions of the previous generation 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 manned spacecraft shells reaches 4...6 mm. In addition, the capabilities of the available equipment do not allow for the development of a modern technological process in which electron beam welding and heat treatment can be performed in one pass.

To solve these problems, a new design of an electron beam gun with a power of 2.5 kW with an accelerating voltage of 10 kV has been developed for welding during repair and restoration works in space conditions and on the surface of the Moon.

In the work, for the first time, a triode emission system is proposed for electron-beam guns for space purposes, which forms an electron beam of high quality, sufficient for electron-beam welding of various metals with a thickness of 4-6 mm.

Thanks to the focusing and deflecting systems, the gun has the ability to focus the electron beam and periodically deflect the programmed intensity of heating by the electron beam along a given trajectory, which was used in the creation of a modern technological process of electron beam welding. To implement the proposed process, the DS-5 system was developed and manufactured, which was used to control the periodic deflection of the electron beam along a given trajectory and programmable heat deposition with different heating intensities during the welding process.

The proven modern technology allows to localize gas inclusions, organize their directed forced movement to the outer surface of the liquid metal and removal from the melt.

The tested modern technology of electron beam welding of aluminum alloys with the distribution of the power of the thermal effect of the electron beam, which allows synthesizing the control of the deflection of the electron beam to create a given temperature field during EBW with simultaneous preheating and subsequent heat treatment of the weld with mixing of the molten metal of the bath by reverse circular sweep and periodic deflection of the electron beam, which allows to localize gas inclusions, organize their directed forced movement to the outer surface of the liquid metal and removal from the melt, which provides new opportunities for creating structures in space conditions and on the surface of the Moon.

Key words: electron-beam welding (EBW), aluminum alloys, welded joints (WJ), ultra-high vacuum, reduced gravity, pore formation, steam-gas channel, long-term lunar bases (LLB), low temperatures, defects in seams, leaks, pores, system of periodic deflection of an electron beam, sweep, mechanical properties, elemental composition, macrostructure, microstructure.