

538
06 09 2014

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

члена-кореспондента НАН України, доктора фізико-математичних наук Федорова Олега Павловича на дисертаційну роботу ГЛУШАКА Сергія Олександровича «РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ КОСМОСУ», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06. «Зварювання таспоріднені процеси і технології»

Рецензована робота присвячена розробленню технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів, який дозволяє при використанні обладнання нового покоління одержувати в космічних умовах зварні з'єднання, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення. Така постановка проблеми передбачає вивчення фізичних процесів, відповідальних за формування структури зварного з'єднання, створення новітнього обладнання та розроблення основ відповідного технологічного процесу. Автор роботи в цілому виконав поставлене завдання, а представлені результати дозволяють сформулювати загальні характеристики проведеного дослідження щодо актуальності, наукової новизни, ступеню обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, практичної значущості а також повноти викладу результатів дослідження в наукових публікаціях.

Ступінь актуальності дисертаційної роботи.

Розроблення технологічних процесів, зокрема зварювання, в космосі для виготовлення, монтажу та ремонту великогабаритних конструкцій як на навколосемній орбіті, так і на поверхні Місяця є одним з магістральних напрямів сучасної практичної космонавтики. Піонерськими експериментами українських фахівців під керівництвом Б.Є. Патона у минулі роки продемонстровано, що електронно-променево зварювання (ЕПЗ) є ефективним і перспективним процесом для виконання цих робіт. Зокрема ефективний ККД становить до 90 %, що є максимальним значенням в порівнянні з іншими способами зварювання. До сьогодні ці роботи відомі широкому загалу фахівців у світі і виступають однією з візитівок внеску України у дослідження та використання космосу.

Водночас подальший розвиток технологій ЕПЗ в рамках космічних програм різних країн не знайшов належного розвитку з різних причин. Сьогодні сформовані числені космічні програми освоєння Місяця, розвитку орбітальних засобів, які об'єктивно вимагають застосування зварювальних технологій, отже продовження відповідних досліджень. У цих умовах розвиток унікального досвіду українських вчених в сфері ЕПЗ є безумовно актуальним не тільки з огляду на перспективність цього напрямку, а також враховуючи можливість міжнародної співпраці на базі пріоритетних вітчизняних інноваційних розробок.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що обрана здобувачем тема дисертаційної роботи є актуальною і такою, що має суттєву значущість для вирішення важливої науково-технічної задачі у галузі космічного матеріалознавства та технологій і повністю відповідає спеціальності 05.03.06. «Зварювання та споріднені процеси і технології».

Структура роботи.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, які містять 20 підрозділів, загальних висновків та переліку посилань.

Вступ до дисертаційної роботи вміщує самооцінку актуальності тематичного напряму роботи, її новизну, зв'язок роботи з діючими науковими програмами та темами. Сформульована загальна мета, основні вирішувані завдання, охарактеризовані об'єкт, предмет та методи дослідження, визначені основні параметри, що свідчать про новизну отриманих результатів та їх практичне значення; обґрунтовано особистий внесок автора та наведені дані про апробацію роботи та основні публікації.

Перший розділ присвячено розгляду фізичних умов відкритого космосу, їх впливу на технологічний процес зварювання, зокрема алюмінієвих сплавів, а також особливостям технологічного процесу. Автор, ґрунтуючись майже виключно на вітчизняних джерелах, висвітлює основні фактори, які впливають на досліджуваний процес, а саме невагомість (більш коректно, умови мікрогравітації), космічний вакуум, різкі перепади температур, а також деякі інші характеристики середовища. Розглянуто досвід використання зварювальних процесів та технологій в космосі, обладнання для проведення електронно-променевого зварювання в космосі, а також споріднених технологічних експериментів. Детально розглянуті та проілюстровані класичні вітчизняні експерименти з ручними електронно-променевими інструментами.

Друга частина цього розділу являє собою огляд методичних підходів в рамках визначеної проблематики, в якому детально розглянуті особливості з'єднання алюмінієвих сплавів, переваги методу ЕПЗ, вплив космічних умов на технологічний процес, фізичні причини виникнення підвищеної пористості в зварних швах алюмінієвих сплавів, ефекти, пов'язані із застосуванням динамічного впливу на електронний промінь при електронно-променевому зварюванні, а також способи дегазації розплавленого металу зварювальної ванни. Наведений огляд виступає методичним підґрунтям проведення експериментів автора і дає можливість сформулювати конкретні завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ дисертації висвітлює результати аналізу фізичної картини процесів у матеріалі при електронно-променевому зварюванні, а саме механізму пороутворення, який є основним критичним фактором, що визначає якість зварного з'єднання. Розглянута спрощена математична модель квазірівноважного процесу, за допомогою якої автор проводив оцінку схильності до пороутворення металу зварного з'єднання. Для цього на основі припущень щодо умов гідростатичного балансу проведений якісний аналіз основних факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор в зварних швах при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації. Автор розглянув два основних механізми зародження дефектності, а саме локальне схлопування паро-газового каналу (ПГК) і кристалізацію пухирців домішкових газів, які не встигають спливати на поверхню розплаву за час існування зварювальної ванни.

Основним результатом цього розділу слід вважати результати технологічних експериментів, які підтверджують загальний висновок щодо підвищеної схильності зварних швів до появи пористості за низького рівня сили тяжіння. Окрім цього показано, що застосований традиційний спосіб дегазації зварювальної ванни перемішуванням

розплавленого металу безперервним одностороннім скануванням електронного пучка з круговою розгорткою не завжди сприяє повній дегазації зварювальної ванни, особливо при зварюванні алюмінієвих сплавів середніх і великих товщин.

У **третьому розділі**, який слід вважати основним за значенням, наведено результати розроблення конструкції електронно-променевого обладнання нового покоління. Розробленню передувало математичне дослідження процесу теплопередачі в електронно-променевої гарматі у процесі її експлуатації, а також лабораторна верифікація розрахунків. На основі цих досліджень та розрахунків розроблена концепція нового електронно-променевого інструменту, який містить електронно-променеву гармату, яка дозволяє формувати гострофокусний пучок діаметром не більше 1 мм в фокальній площині на відстані до 80 мм. Така конструкція дає змогу оператору виконувати технологічні процеси без надмірних зусиль і забезпечить зручне спостереження за ними при достатній відстані від розташування зразка.

Відмінність розробленої гармати від раніше використаних гармат з діодними емісійними системами та прямонакальними катодами полягає у застосуванні тріодної емісійної системи з катодом типу таблетки, який підігрівається електронним бомбардуванням, а безінерційне керування струмом пучка відбувається зміною керуючої напруги на фокусуєчому електроді.

Слід відзначити безсумнівне технологічне досягнення автора, якому вдалося досягти такої питомої потужності пучка, яка дозволяє виконувати зварювання в космосі алюмінієвих сплавів товщиною до 6 мм, титанових сплавів, а також нержавіючих сталей товщиною до 4 мм, що охоплює широкий клас матеріалів, застосування яких очікується у перспективних космічних проектах.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений розробленню елементів технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів на основі застосування описаної в розділі 3 електронно-променевої гармати. Серед додаткових вузлів, які комплектують систему зварювання - електромагнітна фокусуєча та відхиляюча системами електронного променю з програмованим періодичним відхиленням електронного пучка і заданою інтенсивністю нагріву по траєкторії скануючого пучка. Ці вузли дозволяють виконувати інтенсивне перемішування розплавленого металу зварювальної ванни для отримання якісних, бездефектних зварних з'єднань.

Технологічні можливості розробленого обладнання дозволили автору запропонувати однопрохідний процес з однією зварювальною ванною, який включав: попередню та наступну термообробку шва; перемішування розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою електронного пучка, а також зміну інтенсивності теплового потоку у всіх зонах процесу зварювання. Для цього автором використано спеціалізований стенд, оснащений відповідними пристроями.

У цьому ж розділі наведений великий матеріал з описом механічних випробувань, визначення хімічного складу та металографічних досліджень отриманих зварних з'єднань. Комплекс цих досліджень свідчить, що розроблена в роботі зварювальна установка забезпечує кінжальне проплавлення, яке створює однорідний напружений стан по всій товщині зварного з'єднання.

Висновки по роботі узагальнюють основні отримані в дисертаційному дослідженні результати. Дисертація в цілому є структурно та змістовно збалансованою роботою. Послідовність викладення її положень є логічною і такою, що побудована у відповідності з науковим методом.

Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків та їх достовірність не викликає сумнівів, оскільки вона забезпечується:

- коректністю та ефективністю обраної методології дослідження;
- аналізом сучасного стану досліджень в заявленій предметній області;
- комплексним застосуванням теоретичних та експериментальних методів дослідження;
- експериментальним доведенням ефективності запропонованої методики.

Наукова новизна отриманих результатів. В результаті проведеного дослідження отримано низку нових результатів, серед яких найважливішими слід вважати наступні:

- Вперше для електронно-променевої гармати космічного призначення запропонована тріодна електронно-оптична система з довготривалим ресурсом роботи катодного блоку за рахунок комбінованого охолодження.
- 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.
- Запропоновано математичну модель для оцінки схильності металу зварного з'єднання, отриманого кинджальним проплавленням за допомогою висококонцентрованого джерела зварювального нагрівання, за допомогою якої проведений аналіз факторів, що сприяють підвищенню утворенню пор в зварних швах при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

Практичне значення отриманих результатів. В результаті проведеного дослідження дисертантом отримано значну кількість практично важливих результатів, серед яких найважливішими слід вважати наступні:

- Розроблена електронно-променева гармата, яка використовує тріодну емісійну систему, що дозволяє працювати в умовах високого космічного вакууму при прискорювальній напрузі 10 кВ потужністю 2,5 кВт; при цьому, завдяки формуванню електронного пучка високої якості в синтезованій емісійній системі, підвищенню густини струму пучка в місці зварювання (до 9 кВт/мм²) гармата спроможна виконувати зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм, титанових сплавів та нержавіючих сталей товщиною до 4...6 мм
- Завдяки застосуванню фокуруючої та відхиляючої системам гармата має можливість фокусування електронного променя та періодичного відхилення програмованої інтенсивності нагріву електронним променем по заданій траєкторії.
- Розроблені основи технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих

сплавів з перемішуванням зварювальної ванни скануючим електронним променем та зміною інтенсивності теплового потоку у всіх зонах процесу зварювання, що дозволяє завдяки дозованому впливу променю на зварювальну ванну локалізувати газові включення, організувати їх спрямоване примусове переміщення до зовнішньої поверхні рідкого металу і видалення з розплаву.

Повнота викладу результатів дослідження в наукових публікаціях. Основні результати роботи викладені у 18 наукових працях, 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. Особистий внесок здобувача у ці публікації є суттєвим, що наведено у тексті дисертації. Наукові результати, що отримані у дисертаційній роботі, також були представлені і обговорювались на 9-ти міжнародних наукових конференціях. Зміст автореферату є ідентичним до змісту дисертації. Автореферат достатньою мірою висвітлює основні наукові і практичні положення дисертаційної роботи.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

Загалом, позитивно оцінюючи наукове і практичне значення отриманих дисертантом результатів, варто відзначити наступні дискусійні положення і зауваження до змісту дисертаційної роботи.

1. У першому розділі при аналізі космічного середовища та технологічних експериментів в космосі автор розглядає майже виключно вітчизняні джерела минулих років. В той же час доступним є великий обсяг зарубіжних матеріалів, які не тільки надають сучасне бачення тенденцій розвитку космічних технологій, технічні стандарти для отримання матеріалів в космосі, а й свідчать про актуальність розробленої автором тематики ЕПЗ.

2. Представлена у другому розділі спрощена модель схильності до пороутворення металу зварного з'єднання видається дискусійною. Навряд чи результати моделювання в умовах рівноваги можна відносити до «кинджального» проплавлення, який є істотно нерівноважним процесом. Крім того, серед діючих факторів не враховується роль градієнта температур перед фронтом кристалізації, який у відомих експериментальних дослідженнях (включаючи умови мікрогравітації) виступає домінуючим фактором.

3. Основний матеріал дисертації, викладений у третьому розділі, заслуговує високої оцінки. Водночас не можна не висловити зауваження, яке за сутністю є побажанням. Автор розглядає різні технологічні особливості нової апаратури, які дуже бажано було б доповнити прогнозованими умовами безпеки застосування інструменту в космічних умовах. Саме це обмеження викликало призупинення робіт з ЕПЗ у минулі роки, зокрема у США.

4. Багатий і високоякісний експериментальний матеріал четвертого розділу має віддалений зв'язок із назвою і основною метою роботи. Значущість наведених результатів сам автор відносить до застосування у ракетній техніці, а не ЕПЗ в космічних умовах. Зазначений недолік міг би бути знятий редагуванням відповідних розділів дисертації.

5. В тексті дисертації (мета, завдання, основні результати) використовується термін «умови зниженої гравітації», тоді як йдеться про умови зниженої сили тяжіння. В умовах

вільного падіння, а також на орбіті Землі сила гравітації майже дорівнює її значенню на поверхні Землі, а близькою до нуля є саме сила тяжіння.

6. У формулюванні мети роботи та висновках використовується формулювання «створення принципового технологічного процесу», яке не видається коректним. У контексті рецензованої роботи зазвичай вживають термін «наукові основи технології», або «елементи технології» як у деяких розділах тексту.

Загальний висновок

Зазначені зауваження та рекомендації не впливають на загальну позитивну оцінку представленого наукового дослідження. Вважаю, що дисертація на тему «**РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ КОСМОСУ**», представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06. «Зварювання та споріднені процеси і технології» є завершеною самостійною науковою роботою, яка містить нові обґрунтовані результати, що мають істотне значення для галузей космічного матеріалознавства, та процесів зварювання, і за актуальністю, змістом, науковою новизною, обґрунтованістю висновків, достовірністю і значущістю відповідає вимогам МОН України, зокрема пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. зі змінами, внесеними згідно Постанови КМ № 656 від 19.08.2015 р., а її автор, ГЛУШАК Сергій Олександрович заслуговує присудження ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06. «Зварювання та споріднені процеси і технології».

ОФЦІЙНИЙ ОППОНЕНТ:

член-кореспондент НАН України
доктор фізико-математичних наук, директор
Інституту космічних досліджень
НАН України та ДКА України



Олег ФЕДОРОВ

Підпис О. Федорова засвідчую
Учений секретар Інституту космічних досліджень
НАН України і ДКА України

Олена НІЖНІЧЕНКО