



ВІДЗИВ

офіційного опонента д.т.н., проф. Квасницького В.В.
на дисертаційну роботу Глушака Сергія Олександровича
**«РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО –
ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В
УМОВАХ КОСМОСУ»**,

що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

Дисертаційна робота має загальний обсяг 174 сторінки, включаючи 63 рисунки, 15 таблиць і складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел зі 145 найменувань на 13 сторінках.

Дисертація Глушака С.О. присвячена дослідженню технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів в умовах зменшеної гравітації з метою формування зварних з'єднань з високими характеристиками якості конструкцій космічного призначення та створенню нового покоління обладнання для ЕПЗ в умовах космічного простору.

Актуальність обраної теми дисертації. Сучасною проблематикою опанування та дослідження космічного простору є створення високоефективних технологій та обладнання для обробки та з'єднання матеріалів, що використовуються для створення космічних об'єктів, зокрема космічних станцій та баз довготривалого використання. Порівняно з іншими способами зварювання та обробки матеріалів, електронно-променева обробка, зокрема і електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) є найбільш технологічним процесом, що доведено практикою. Однак, сучасні апробовані в космосі технології ЕПЗ та наявне обладнання не дозволяє отримати якісні зварні з'єднання з металів товщиною 4-6 мм та більше, що вимагає створення нового покоління обладнання з підвищеною потужністю та нових технологічних процесів зварювання та обробки, що свідчить про безумовну актуальність та своєчасність представленої роботи.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з науково-дослідними темами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, які виконувались за безпосередньою участю автора в якості виконавця, зокрема: «Дослідження і вдосконалення електронно-променевих технологічних процесів для космічних умов і розробка нового покоління апаратури для їх реалізації» (№0117U001263; 30.12.16); «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); «Розробка обладнання і принципової технології 3D принтіngu 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).

Метою роботи є створення технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів, яка дозволяє в умовах зменшеної гравітації формувати якісні зварні з'єднання, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення з використанням обладнання нового покоління.

У **вступі** автором обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульована мета, визначені задачі досліджень, відзначені наукова новизна та практичне застосування отриманих результатів.

У **першому розділі** показана перспективність застосування ЕПЗ для з'єднання та обробки алюмінієвих сплавів, проаналізовані особливості фізичних умов відкритого космосу, визначений вплив цих умов на особливості перебігу процесів зварювання алюмінієвих сплавів та на основі аналізу літературних джерел доведена необхідність керування процесом кристалізації металу з метою уникнення дефектоутворення та зменшення пористості металу зварних з'єднань. На основі проведеного аналізу літературних джерел сформульована мета роботи, визначені основні напрямки роботи і завдання досліджень.

У **другому розділі** представлені результати виконаних автором комплексних наукових досліджень щодо визначення механізмів пороутворення в процесі ЕПЗ алюмінієвих сплавів в умовах дії зменшеної гравітації, проведений аналіз схильності до пороутворення металу зварних з'єднань за умови багнетного проплавлення, здійснений якісний аналіз основних факторів, які сприяють утворенню пор у зварних швах при ЕПЗ алюмінієвих сплавів з формуванням парогазового каналу, досліджений процес ЕПЗ стикового з'єднання пластин з алюмінієвого сплаву 5456 завтовшки $t = 5$ мм за умови дії прискорення вільного падіння в межах від 0 до земного, створена математична модель, яка дозволяє оцінити вплив різних технологічних параметрів та умов реалізації процесу ЕПЗ на ймовірність утворення пор та визначені необхідні заходи їх попередження.

Третій розділ присвячений створенню конструкції електронно-променевого обладнання нового покоління. На основі аналізу проведених автором теплових досліджень запропонована концепція нового електронно-променевого інструменту, який включає електронно-променеву гармату, що дозволяє сформувати гострозфокусований промінь діаметром менше за 1 мм на відстані до об'єкту, що обробляється до 80 мм. На основі аналізу факторів, які ускладнюють процес отримання високоякісних зварних з'єднань доведено, що концептуально нове обладнання дозволяє полегшити оператору процес формування з'єднань за рахунок зменшення фізичних зусиль та покращення

умов спостереження за процесом зварювання. Додатковою перевагою концептуальної гармати є зменшене у порівнянні з діодними прямонакальними гарматами споживання електричного струму.

На основі проведених розрахункових та експериментальних досліджень створена технічна документація на нову електронно-променеву гармату для зварювання в умовах, що характерні для поверхні Місяця, яка дозволяє вести технологічний процес зварювання як у ручному, так і в автоматичному режимах.

Технологічні випробування новоствореної гармати свідчать про те, що при її застосуванні суттєво підвищується питома потужність електронного променя. Це дозволяє зварювати в умовах космічного простору сплави на основі алюмінію товщиною до 6 мм, титанові сплави та неіржавіючі сталі товщиною до 4 мм.

В четвертому розділі представлені результати створення елементів технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів в умовах космічного простору з використанням створеного автором обладнання нового покоління, наведені результати досліджень фізико-механічних властивостей та структурної будови зварних з'єднань дослідних зразків.

Особливістю створеної електронно-променевої гармати є наявність електромагнітної фокуруючої та відхиляючої систем електронного променя з програмованим його відхиленням та регульованим тепловкладенням, що забезпечує кероване перемішування розплаву металу зварювальної ванни. Кероване перемішування розплаву одночасно з можливістю регульованого попереднього та післязварювального нагріву дозволяє регулювати термічний цикл зварювання та процес кристалізації розплаву, що сприяє одержанню зварних швів з підвищеними характеристиками якості.

За результатами проведених автором чисельних експериментально-розрахункових досліджень та випробувань встановлено, що поєднання процесів зварювання, попередньої та післязварювальної термообробки призводить до збільшення часу циклу роботи розгортки та зменшенню частоти сканування електронного променя, що необхідно враховувати при проектуванні розгортки.

Наведені результати технологічних випробувань по формуванню стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів 5456 і 2219 з відбортовкою крайок ЕПЗ з періодичним відхиленням електронного пучка свідчать про те, що застосування скануючого електронного променя дозволяє уникнути дефектів типу пор та зменшує хімічну неоднорідність металу зварних швів.

Визначені фізико-механічні характеристики зварних з'єднань за умови дії як підвищених, так і від'ємних температур, які є характерними для космічного простору.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків дисертації

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи мають теоретичні та експериментальні підтвердження. Обґрунтованість наукових положень і рекомендацій доведена математичним моделюванням та чисельними результатами експериментальних досліджень реальних зразків зварних з'єднань, які проводились із застосуванням оптичної та растрової електронної мікроскопії, випробуваннями фізико-механічних характеристик зразків зварних з'єднань на сертифікованому обладнанні із застосуванням стандартизованих методик, результатами фізичних методів визначення рівня діючих залишкових напружень з використанням методу спекл-інтерферометрії.

Отримані автором теоретичні закономірності не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями. Їх достатня обґрунтованість підтверджуються визнанням на відомих міжнародних конференціях зі зварювання, ракетобудування та дослідження космічного простору.

Достовірність одержаних результатів. Основні наукові результати та висновки дисертаційної роботи мають теоретичні та експериментальні підтвердження. Про достовірність наукових положень роботи свідчить використання сучасних методів досліджень механіки руйнування твердого тіла та сертифікованого обладнання, загальноприйнятних наукових гіпотез, розрахункових математичних методів та застосування сучасних програмних пакетів. Достовірність результатів та висновків роботи підтверджена доброю збіжністю отриманих значень експериментальних і розрахункових досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

Сукупність теоретичних положень і практичних результатів роботи може бути кваліфікована як аналіз, теоретичне узагальнення і рішення науково-прикладної задачі. Отримані в роботі результати можуть бути використані при оцінюванні характеристик якості отриманих за технологією ЕПЗ зварних з'єднань алюмінієвих сплавів і можуть бути розповсюджені на інші матеріали та технології зварювання плавленням металів та сплавів.

Автором вперше запропонована тріодна електронно-оптична система зі збільшеним ресурсом роботи катодного блоку за рахунок застосування комбінованого охолодження електронно-променевої гармати космічного призначення.

На основі отриманих нових експериментальних та розрахункових даних запропонована математична модель формування при ЕПЗ парогазового каналу, за допомогою якої вперше встановлено, що найбільший вплив на його стійкість та утворення в процесі кристалізації пор, які викликані наявністю домішкових газів, має співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу

розплаву металу, які несуттєво залежать від сили гравітації, а гідростатичний тиск зменшується при зменшенні величини сили гравітації, що створює незначний позитивний вплив на стабільність існування парогазового каналу та зменшує схильність розплаву металу до утворення пор.

Вперше визначений вплив величини сили гравітації та розміру пухирців газу на швидкість їх випливання з розплаву при ЕПЗ в умовах дії зменшеної сили гравітації. Розрахунковими методами встановлено, що при зменшенні величини прискорення вільного падіння нижче за 3 м/с^2 стрімко зростає розмір пухирців газу, які не встигнуть виділитись з розплаву металу до повної кристалізації зварювальної ванни.

Автором вперше для виконання ЕПЗ запропоновані варіанти розподілу потужності теплового впливу електронного променя, які дозволяють здійснювати керування ним з метою створення заданого поля розподілу температур при зварюванні з одночасними попереднім та післязварювальним підігрівом.

Практичне значення роботи полягає в створенні математичної моделі якісної оцінки схильності металу зварного з'єднання при багнетному проплавленні під дією тепла висококонцентрованого джерела зварювального нагріву до зародження пор у металі зварного шва, за допомогою якої проведений аналіз факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор у зварних швах при ЕПЗ алюмінієвих сплавів в умовах зменшеної гравітації; розроблена електронно-променева гармата космічного призначення підвищеної потужності, яка використовує тріодну емісійну систему та забезпечує можливість фокусування електронного променя і періодично програмовану зміну інтенсивності введення тепла електронним променем по заданій траєкторії; принципової технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів з перемішуванням зварювальної ванни електронним променем, що здійснює сканування.

Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях. Основні результати досліджень дисертації опубліковані в 18 наукових роботах, 1 з яких - у виданні, яке входить до переліку фахових видань України, 4 - опубліковані в спеціалізованих виданнях, які внесені до наукометричної бази Scopus, 9 - виданих в збірниках міжнародних науково-технічних конференцій доповідей та 4 - в інших галузевих виданнях.

Результати роботи достатньо широко висвітлені публікаціями у вітчизняних та закордонних виданнях, наприклад, журналах «Автоматичне зварювання», «Космічна наука технологія», публікації в «State Phenomena Submitted».

Висновки дисертації відображають найважливіші наукові та практичні результати роботи, у якій теоретично обґрунтовані та експериментально

підтверджені закономірності формування зварних з'єднань сплавів алюмінію при ЕПЗ в умовах дії зменшеної величини сили гравітації, створений принциповий технологічного процес ЕПЗ алюмінієвих сплавів, який забезпечує формування зварних з'єднань, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення з використанням запропонованого автором обладнання нового покоління.

Висновки сформульовані коректно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

Зміст дисертації і автореферату ідентичний. Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює наведені в дисертаційній роботі результати.

У цілому дисертація написана грамотно та якісно оформлена, побудована логічно і зрозуміло, але є деякі зауваження та коментарі.

Зауваження та коментарі по дисертації

1. Робота має деякі некоректності, неточності та описки. Наприклад, стор. 3 другий абзац «...кристалізацію бульбашок домішкових газів...»; стор. 24 третій абзац «...основоположниками...»; стор. 25 перший абзац «...нанесенням покриттів ...»; стор. 28 останній абзац «...термічні напруги...»; стор. 111 перший абзац «Такий же датчик...»; стор. 125 останній абзац «...технологічного процесу [8-Т-ст2].»; форматування деяких таблиць та підписів під рисунками в розділі 4; використання в різних розділах дисертаційної роботи не стандартизованих системою СІ одиниць виміру, наприклад, торр замість Па та ін. Бажано було б навести в роботі перелік застосованих скорочень та аббревіатур.

2. На стор. 4 автор використовує вислів «В роботі вперше для електронно-променевих гармат космічного призначення запропонована тріодна емісійна система, яка формує електронний пучок високої якості...», бажано пояснити, які характеристики електронного променя має на увазі автор коли стверджує про його високу якість, а також, які деформації автор вважає за деформації «...великих розмірів...» про які він говорить «Оскільки вся конструкція та її окремі елементи схильні до температурних коливань (крива 3), що, в свою чергу, призводить до деформацій великих розмірів.» на стор. 28. наведений автором рис. 1.1 бажано пояснити, оскільки в його описі одна і та сама крива 3 описана як «...крива температурних коливань...» та «...крива термічних напружень...», а в підписі під рисунком як «...характер деформування...».

3. Бажано пояснити, що має на увазі автор під «...характерними параметрами стану металу» про, що він стверджує на стор. 72. Назва рис. 2.2 «Співвідношення між зусиллями...» не відповідає наведеному на ньому відомостям оскільки співвідношення не наведені, а зусилля мають визначатися,

наприклад, в Ньютонах, а не в Па, тому необхідні додаткові пояснення.

4. В підрозділі 2.3 - Технологічні експерименти по відпрацюванню технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів автором визначені режими ЕПЗ, також режими зварювання наведені в табл. 4.4. Чи можуть бути використані ці режими при ЕПЗ конструкцій в космічному середовищі?

5. З висновку 4 по розділу три «Оптимізована тріодна емісійна система електронно-променевої гармати розроблена в двох модифікаціях – довгофокусна і короткофокусна. Довгофокусна емісійна система призначена для використання переважно у гарматі ручного електронно-променевого інструменту. Короткофокусна тріодна емісійна система може бути використована в гарматах у складі автоматизованих електронно-променевих технологічних комплексів та роботів зі штучним інтелектом.» не зрозуміло чи довгофокусну чи короткофокусну систему має спроектована та виготовлена за участі автора електронно-променева гармата.

6. Наведені на рис. 4.3 та 4.4 відомості є зрозумілими не повною мірою і вимагають додаткових пояснень.

7. Бажано пояснити за якою методикою, з використанням якого програмного забезпечення здійснювалась «Комп'ютерна обробка інтерференційних зображень...» яка дозволила отримати дані про переміщення в площині зразка навколо отвору та як здійснювали обчислення величин залишкових напружень про, що автор стверджує на стор. 156 та, що має на увазі автор в висновку 9 по розділу чотири коли стверджує «Це підтверджує, що розроблена зварювальна установка забезпечує кінжальне проплавлення, яке створює однорідний напружений стан по всій товщині зварного з'єднання».

Однак відзначені недоліки та зауваження не зменшують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

Загальний висновок. Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертаційна робота Глушака С.О. є завершеною науково-дослідною розробкою, що присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі, а саме створенню технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів, яка дозволяє в умовах зменшеної гравітації формувати якісні зварні з'єднання, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення, створенню нового покоління обладнання для ЕПЗ.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем представлена робота відповідає

вимогам п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо кандидатських дисертацій, а її автор Глушак Сергій Олександрович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 — Зварювання та споріднені процеси і технології.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри зварювального виробництва
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
доктор технічних наук,
професор



Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

Підпис завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н, професора Квасницького В.В. засвідчую:

Вчений секретар
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



Валерія ХОЛЯВКО