

25 03 2021

ВІДГУК

офіційного опонента д-ра техн. наук **В.В.Перемітька**
на дисертаційну роботу **ГРИНЮКА Андрія Андрійовича**
«Плазмо-дугове зварювання алюмінієвих сплавів
різнополярним асиметричним струмом»,

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

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Збільшення частки конструкцій, що виготовляються із використанням високоміцних алюмінієвих сплавів, носить характер тривалої тенденції. Для задоволення зростаючого попиту розробляються нові ефективні сплави, зокрема з додаванням літію. Відчутною є також потреба у розробці високопродуктивних технологій зварювання подібних об'єктів, за допомогою яких можна забезпечити високі механічні характеристики з'єднань та тривалий ресурс експлуатації конструкцій.

Враховуючи зварюваність алюмінієвих сплавів систем легування Al-Cu-Mg, Al-Cu-Li, Al-Mg-Li, із яких виготовляють широку гаму об'єктів у судно- та вагонобудуванні, автомобільній та авіакосмічній промисловості, альтернативним процесу аргонодугового зварювання є плазмо-дугове, яке вирізняє більші значення потужності та концентрації тепловводу. Важливим аспектом є також попередження дефектів у металі з'єднань, у тому числі за рахунок відповідного живлення.

Виходячи з цього, дослідження особливостей фізико-металургійних процесів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом є актуальною науково-технічною задачею.

Актуальність теми підтверджується також виконаним комплексом науково-дослідних робіт в ІЕЗ ім. Є.О. Патона в рамках державних науково-технічних програм «Дослідити фізико-металургійні процеси та розробити технології зварювання плавленням нового класу високоміцних сплавів і композитів на основі алюмінію та різнорідних матеріалів» (№ ДР

0103U005428, 2003-2005 рр.); «Розробка наукових основ перспективних технологій зварювання високоміцних легких матеріалів і забезпечення міцності та довговічності зварних елементів конструкцій аерокосмічної техніки» (№ ДР 0110U002740, 2010-2013 рр.); «Розробка конструкції гібридного плазмотрону з осьовою подачею електродного дроту» » (№ ДР 0115U006700, 2015 р.); «Дослідження фізико-металургійних процесів при гібридному та комбінованому зварюванні з поєднанням плазми і дуги плавкого електрода та створення програмно-апаратного забезпечення для реалізації технологій зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів та суднобудівних сталей» (№ ДР 0117U001186, 2016-2019 рр.); «Доопрацювання тандем-процесу «плазмо-дугове зварювання – ЕДО» та технологічної оснастки для його реалізації» (№ ДР 0118U005494, 2018-2019 рр.); «Підвищення ресурсу зварних промислових і транспортних конструкцій шляхом розробки та застосування комбінованої технології «швидкісне гібридне плазмове зварювання струмопровідним дротом + електродинамічна обробка» (№ ДР 2016-2020 рр.). При реалізації зазначених науково-технічних програм автор дисертації був співвиконавцем.

2. Наукова новизна одержаних результатів

В якості нових наукових результатів можна визначити наступне:

– встановлений експериментально ефект видалення газових включень з рідкого металу зварювальної ванни за рахунок її коливання низькочастотними пульсаціями струменю плазмоутворювального газу, який забезпечує однакове з модуляцією зварювальним струмом зменшення кількості пор;

– факт перевищення при позацентровому розтягуванні на 30% межі міцності та ударної в'язкості металу швів алюміній-літійєвих сплавів, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом, у

порівнянні зі швами, отриманими аргонодуговим зварюванням, а також перевищення зазначених величин на 10% у разі використання підкладок;

- закономірності впливу швидкості зварювання на зміну механічних властивостей зварних з'єднань сплавів систем Al-5Mg-Mn, Al-3Cu-1,8Li, Al-6Cu-Mn та встановлене зростання їх міцності до досягнення «пікової» швидкості, з її подальшим спадом по причині утворення підрізів та збільшення кількості пор у металі шва;

- встановлене стрімке зростання міцності металу шва при досягненні швидкістю зварювання сплавів Al-6Cu-Mn та Al-3Cu-1,8Li пікового значення та виявлена обернена залежність величини пікової швидкості від вмісту міді у металі шва;

- різке зменшення залишкових деформацій з'єднань при досягненні пікової швидкості зварювання, значення якої обернено пропорційне товщині поєднаних елементів.

3. Практична цінність роботи

За результатами досліджень, виконаних дисертантом, розроблені технології плазмо-дугового зварювання листів з алюмінієвих сплавів різного хімічного складу товщиною до 10 мм різнополярним асиметричним струмом за один прохід без розроблення крайок;

запропоновано конструкцію плазмотрону із підвищеним ресурсом роботи, що забезпечує стабільність плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом на струмах до 450 А, на основі якої створено лінійку промислових плазмотронів для плазмового точкового зварювання та комбінованого зварювання стисненою дугою;

розроблено конструкцію плазмового модулю, на базі якого запропоновані комплекси обладнання для ручного, механізованого та автоматичного плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом;

результати досліджень лягли в основу промислової технології зварювання елементів електричної арматури авіаційних двигунів, а також використані при виготовленні зразків серійного обладнання для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом різного ступеня механізації.

4. Обґрунтованість наукових положень у дисертації та їх достовірність

Ступінь обґрунтованості наукових положень, які сформульовані у дисертаційній роботі, а також висновків та практичних рекомендацій є високим, мету і задачі досліджень поставлено чітко. Достовірність одержаних результатів не викликає сумніву. Вірогідність викладених наукових положень та практичних рекомендацій підтверджено сучасними методиками, які автор використовував у своїх дослідженнях.

Основні наукові положення та результати досліджень доповідалися на численних національних і міжнародних семінарах, конференціях і форумах. Це свідчить про достатню ступінь апробації роботи.

Основний зміст дисертації та найважливіші висновки викладені у статтях, опублікованих у фахових журналах, що входять до переліку рекомендованих МОН України видань для публікації праць здобувачів наукового ступеня.

5. Структура та зміст дисертації

Дисертація та автореферат містять усі необхідні структурні розділи, написані українською мовою й оформлені відповідно до вимог ДАК України.

Дисертаційну роботу виконано в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. Вона складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг

роботи – 197 сторінок, включаючи 101 рисунок, 25 таблиць та список використаних джерел із 101 найменування на 11 сторінках.

Представлено автореферат дисертації, який містить 20 сторінок друкованого тексту, в тому числі список з 27 робіт, опублікованих автором за темою дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи; подано мету та основні напрямки досліджень, а також наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію основних наукових положень та наукові публікації.

У **першому розділі** наведено результати аналізу особливостей зварювання алюмінієвих сплавів електричною дугою різнополярним асиметричним струмом. Підкреслено, що процес плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів виник як продовження аргонодугового зварювання неплавким електродом змінним синусоїдальним струмом. Недоліком плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів змінним синусоїдним струмом зазначено нестабільність горіння дуги при її переході через нульову лінію від оберненої полярності до прямої та надмірне нагрівання вольфрамового електроду. Використання стислої дуги постійного струму при оберненій полярності дозволило, застосовуючи просте устаткування, ефективно очищати поверхню алюмінієвих сплавів та зварювальної ванни від включень оксидної плівки. Поява джерел живлення з можливістю створення амплітудної і широтної асиметрії зварювального струму дало новий імпульс до розвитку плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів. Сформульовано мету дисертаційної роботи.

У **другому розділі** описані методики досліджень, які розроблялися та/або застосовувалися при виконанні роботи; зокрема створеного стенду для проведення досліджень фізико-металургійних особливостей плазмо-дугового зварювання, температурних полів та напружено-деформованого стану

зразків при зварюванні; проведення технологічних експериментів та механічних випробувань зварних зразків.

Третій розділ присвячений дослідженням закономірностей впливу основних технологічних факторів плазмо-дугового зварювання на особливості перебігу фізико-металургійних процесів при формуванні зварних з'єднань з алюмінієвих сплавів. Зокрема, виявлено, що вольт-амперна характеристика стисненої дуги має чітку тенденцію на прямолінійне збільшення напруги з ростом величини струму, а напруга на дузі при оберненій полярності на 5 В більша ніж при прямій полярності при однакових значеннях зварювального струму. При використанні різнополярного асиметричного струму є можливість додатково змінювати потужність стисненої дуги співвідношенням тривалостей протікання струму при прямій та оберненої полярності.

Зафіксовано збільшення напруги стисненої дуги до 18% у разі зростання витрат плазмоутворювального газу при незмінних значеннях сили струму та діаметрі каналу плазмоутворювального сопла. Визначено, що максимально-допустимі витрати плазмоутворювального газу, при яких зварний шов формується без дефектів, залежить від величини зварювального струму та об'єму рідкого металу зварювальної ванни. Зазначено, що зі зростанням частоти різнополярного струму з 50 до 200 Гц глибина проплавлення збільшується більш ніж у два рази. Більша частота різнополярного струму обумовлює зменшення ширини шва та збільшення глибини проплавлення металу внаслідок зменшення діаметру активної плями на поверхні зварювальної ванни. Зростання частоти різнополярного струму покращує якість формування зварного з'єднання, що помітно при плазмо-дуговому зварюванні без підкладки, в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя.

Підкреслено також, що глибина проплавлення може суттєво відрізнятись при досягненні швидкістю зварювання та величиною

зварювального струму оптимальних значень, необхідних для плавлення алюмінієвого сплаву певної товщини та хімічного складу.

Для уникнення дефектів у вигляді підрізів та внутрішніх порожнин рекомендується враховувати взаємний вплив декількох параметрів: зі збільшенням сили струму необхідно зменшувати витрати плазмоутворювального газу, частоту різнополярного струму слід обмежувати 150 Гц; для забезпечення катодного руйнування оксидної плівки на поверхні зварюваних деталей баланс дуги не має перевищувати 75% прямої полярності.

У четвертому розділі наведені результати дослідження особливостей формування зварних з'єднань із високоміцних алюмінієвих сплавів систем Al-Mg-Mn, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Li, Al-Mg-Li, визначені шляхи керування структурою та мінімізації дефектів та викладено методику розрахунку параметрів плазмо-дугового зварювання.

Для мінімізації утворення внутрішніх пор в швах при зварюванні алюмінієвих сплавів запропоновано модуляцію частоти струму замінити імпульсним подаванням газу. Імпульси плазмоутворювального газу подаються в зону електроду з частотою 4...6 Гц при співвідношенні тривалості подачі газу з максимальними витратами до тривалості його подачі з мінімальними витратами як 3:1. В імпульсі співвідношення максимальних витрат плазмоутворювального газу до мінімальних пропонується 10:1 при рівні мінімальних витрат порядку 0,1 л/хв. Захисний газ при цьому слід подавати неперервно, з витратами в межах 25...35 л/хв. Зазначається, що модульоване подавання плазмоутворювального газу не впливає на формування верхньої поверхні швів та може використовуватись при швидкостях зварювання до 120 см/хв.

Для визначення оптимізованих параметрів процесу ПДЗ у нижньому положенні на підкладці створено методику розрахунку технологічних параметрів, яка базується на визначенні зварювального струму залежно від ефективної енергії стисненої дуги.

Зазначено, що дослідна перевірка точності запропонованої розрахункової методики виявила різницю між розрахунковими і експериментальними значеннями зварювального струму в межах 2%

У п'ятому розділі наведені результати комплексної оцінки впливу швидкості плазмо-дугового зварювання на механічні властивості, показники довговічності та напружено-деформований стан зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів обраних марок та систем легування.

Встановлено, що зростання механічних властивостей внаслідок збільшення швидкості зварювання має конкретні обмеження, передусім через чутливість алюмінієвих сплавів до перегріву та хімічний склад. У термічно зміцнюваних алюмінієвих сплавах спостерігається стрімке зростання показників міцності при збільшенні швидкості зварювання. Повідомляється, що для кожної системи легування існують «пікові значення» швидкості зварювання, перевищення яких приводить до зменшення міцності внаслідок погіршення умов формування та дегазації шва.

Виявлено, що міцність з'єднань, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом на підкладці з формувальною канавкою в середньому на 10% вищі у порівнянні зі зварювання в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя. У порівнянні з аргонодуговим зварюванням неплавким електродом, зразки із алюміній-літійєвих сплавів, отримані плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом, мають на 10-30% вищі показники міцності при одновісному та позацентровому розтягуванні.

Шостий розділ присвячено основам створення обладнання та промислових технологій швидкісного плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів. Запропоновано блочно-модульну концепцію створення технологічного комплексу, наведено апаратурну схему та конструкцію плазмового модулю для ручного та автоматичного плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом. На підставі

комп'ютерного моделювання газодинаміки та конструктивних параметрів створено універсальний плазмотрон для автоматичного (роботизованого) шовного та точкового, а також комбінованого зварювання алюмінієвих сплавів.

Представлено технологію комбінованого зварювання стисненою дугою неплавкого електроду різнополярним струмом та імпульсно-дугового зварювання плавким електродом постійним струмом оберненої полярності. Повідомляється, що така схема дозволяє зменшити на 30% витрати електродного металу у порівнянні з традиційним імпульсно-дуговим зварюванням, зменшити знеміцнення основного металу та розміри шва. Процес може бути ефективним при однопрохідному зварюванні з'єднань з розкриттям крайок листів товщиною до 16 мм на швидкості до 50 см/хв.

Наводиться інформація про промислове впровадження результатів роботи, зокрема про створення та запуск у серійне виробництво у ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» обладнання для ручного, автоматичного плазмо-дугового зварювання, а також в складі роботизованих ліній, та про реалізацію промислового технологічного процесу зварювання елементів електричної арматури на НВО «Мотор Січ».

Висновки дисертації повністю відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації. Вони сформульовані конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

Зміст дисертації та автореферату ідентичний. Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює результати, наведені в самій дисертації.

6. Апробація положень та результатів дисертації та повнота їх викладення в опублікованих роботах

Основні результати дисертації опубліковані в 27 наукових працях, які включають 13 статей у наукових фахових виданнях, з яких 3 у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus; 11 тез та матеріалів наукових і

науково-практичних конференцій. Наукові публікації охоплюють всі розділи дисертаційної роботи. Отримано два патенти України на винахід.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

7. Зауваження по дисертаційній роботі

1. Пункт 5 наукової новизни не містить жодних цифрових значень (декілька разів, до певної пікової швидкості, подальше збільшення, суттєве зменшення), що ускладнює оцінку та застосування отриманого результату.
2. Рисунок 2.3 (стор.49) загального вигляду шафи керування є не досить інформативним, доречнішим було б наведення функціональної схеми системи керування комплексом обладнання.
3. Міститься протиріччя у повідомленні (стор.55) того, що «...для визначення впливу параметрів режиму плазмо-дугового зварювання... на геометрію швів виконували наплавлення без використання присадкового дроту».
4. У п.2.7 не міститься обґрунтування вибору саме розрахункової методики Трочуна І.М. для визначення напружено-деформованого стану зварних зразків.
5. У п.3.3, при розгляді впливу витрати $q_{\text{плазм}}$ плазмоутворювального газу на формування швів, межі регулювання $q_{\text{плазм}}$ обиралися з міркування отримання якісних швів, проте критерії якості не наводяться.
6. Деякі твердження виглядають не зовсім обґрунтованими. Так, на стор.90 на підставі досвіду використання гелій-неонових сумішей при аргоно-дуговому зварюванні прогнозується зменшення глибини проплавлення на $\leq 7\%$ у разі використання такої суміші при плазмово-дуговому зварюванні.
7. У п.2 висновків до розділу 3 не повідомляється, при зростанні до яких величин (або наскільки) витрати $q_{\text{плазм}}$ відбувається збільшення напруги стисненої дуги до 18%.

8. Не зазначається, у який спосіб проводилося вимірювання середньої ширини бокових прошарків (шарів?) розплавленого металу в області кратера під час зварювання в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя (стор.100).
9. Для даних, наведених у п.4.5.2 щодо рекомендованих параметрів режиму зварювання та численних коригуючих коефіцієнтів, бракує узагальнення із складанням регресійних залежностей, які б дозволили розраховувати очікувані геометричні розміри швів.
10. Не можна погодитися з твердженням автора, що глибина проплавлення при плазмо-дуговому зварюванні на однакових із аргонодуговим зварюванням швидкості та струмі зростає через більше значення напруги (стор.152), тобто нехтуються відмінності у тискові та зосередженості джерел теплоти.
11. Пункт 8 висновків до розділу 5 містить результати банального розрахунку температур без зазначення наслідків виявленого характеру нагріву.
12. У роботі зустрічаються окремі граматичні помилки за текстом (наприклад, стор.15-17, 21-30, 41, 57, 63, 68, 72, 81, 90, 93, 100, 108, 136, 144, 168, 184) та неточності використання понять («розміцнення» сплавів (стор.15) замість «знеміцнення» або „знеміцнювання”, «щільність» потужності (стор.15) замість «густина», «обернена» полярність (стор.21) замість «зворотна»).

Загальний висновок

Відмічені недоліки та зауваження, зроблені до окремих положень дисертації, не стосуються кваліфікаційних ознак роботи і не знижують її загального наукового рівня.

У цілому дисертаційна робота Гринюка Андрія Андрійовича «Плазмо-дугове зварювання алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом», є завершеним науковим дослідженням в області технології та устаткування для плазмо-дугового зварювання із мінімізованою погонною

енергією алюмінієвих сплавів, яке за обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем повністю відповідає вимогам до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, зокрема, пунктам 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567.

Автор дисертаційної роботи – Гринюк Андрій Андрійович – заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та спорідненні процеси і технології.

Офіційний опонент,
декан металургійного факультету
Дніпровського державного технічного
університету (ДДТУ), професор кафедри
технології та устаткування зварювання,
д-р техн. наук, професор



В.В.Перемітько

Підпис Перемітька Валерія Вікторовича засвідчую:

Учений секретар ДДТУ
канд. соціолог. наук, доцент



Л.М.Сорокіна