

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О.ПАТОНА**



ГРИНЮК АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ

УДК 621.791.755

**ПЛАЗМО-ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ
РІЗНОПОЛЯРНИМ АСИМЕТРИЧНИМ СТРУМОМ**

Спеціальність 05.03.06

Зварювання та споріднені процеси і технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі електротермічних процесів обробки матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, старший дослідник
Коржик Володимир Миколайович,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України, завідувач відділу
електротермічних процесів обробки
матеріалів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
В.В. Перемітько
Дніпровський державний технічний
університет,
декан металургійного факультету

кандидат технічних наук, професор
О.М. Костін
Національний університет
кораблебудування імені адмірала Макарова,
кафедра зварювального виробництва

Захист відбудеться «7» квітня 2021 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, за адресою: 030165, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11, корпус 4, ауд. 1005.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України за адресою: 030165, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11, корпус 4.

Автореферат розісланий «05» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

кандидат технічних наук



Є.В. Шаповалов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку науки і техніки існує потреба зварювати конструкції із високоміцних алюмінієвих сплавів різних систем легування (наприклад, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Li, Al-Mg-Li). Дані конструкції застосовують в авіакосмічній промисловості, судно- і вагонобудуванні, при виготовленні автомобільного транспорту тощо. Традиційно цю задачу вирішують за рахунок застосування добре відомого процесу аргонодугового зварювання неплавким електродом різнополярним струмом (АДЗНЕ) зварювання із розробкою крайок, якій здійснюють переважно за кілька проходів (не менш двох). Високоміцні алюмінієві сплави, особливо зі вмістом літію, схильні до утворення в процесі аргонодугового зварювання дефектів у вигляді оксидних включень. Тепло, яке виділяється під час зварювання АДЗНЕ з не високою концентрацією енергії в плямі нагрівання, викликає розміщення таких сплавів в зоні термічного впливу. Одним із шляхів збільшення продуктивності зварювання таких конструкцій та підвищення якості швів є застосування економічного однопрохідного дугового зварювання. Більш за все під цю характеристику підходить плазмо-дугове зварювання, яке забезпечує щільність потужності не менш 300 Вт/мм², що в порівнянні із ТІГ зварюванням, приблизно в 5 разів перевищує цей показник і, щонайменше в 3 рази – швидкість зварювання. Однак, для встановлення механізмів і природи протікання фізичних явищ при формуванні зварних швів і, відповідно, розширення застосування даного процесу необхідно виконати системні дослідження в таких напрямках:

- встановлення закономірностей отримання зварних швів при швидкостях зварювання, які перевищують швидкість зварювання АДЗНЕ в 3 та більше разів для різних систем легування алюмінієвих сплавів;
- аналіз особливостей формування швів без використання підкладних елементів з формуючими канавками;
- вивчення природи утворення газових пор при використанні концентрованих джерел нагрівання та методи ефективної боротьби з ними;
- виявлення особливості формування швів на вертикальній площині та можливості збільшення швидкості плазмо-дугового зварювання;
- розробка методики розрахунку параметрів режиму зварювання з урахуванням теплофізичних особливостей алюмінієвих сплавів різних систем легування та швидкості зварювання.

Вирішення зазначених питань значно підвищить продуктивність і якість зварювання конструкцій з алюмінієвих сплавів, що робить актуальною науково-технічну задачу дослідження особливостей фізико-металургійних процесів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (ПДЗ).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України 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 осьюовою 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.).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – встановлення закономірностей впливу основних параметрів процесу плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом на формування структури, механічних властивостей, запобігання утворення характерних дефектів та напружено-деформований стан в з'єднаннях із високоміцних алюмінієвих сплавів, а також створення на цій базі методики розрахунку режимів зварювання та створення комплексів обладнання для ручного, автоматичного та роботизованого плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан, тенденцій розвитку і основних недоліків процесів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (ПДЗ) алюмінієвих сплавів.
2. Встановити особливості комплексного впливу параметрів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом на формування швів на алюмінієвих сплавах. Визначити можливості збільшення проплавлення металу не лише за рахунок співвідношення між силою зварювального струму та швидкістю зварювання.
3. Визначити характерні відмінності формування структури та механічних властивостей швів алюмінієвих сплавів системи легування Al-Mg-Li та Al-Cu-Li, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом при різних умовах формування кореневої частини швів.
4. Розробити комплекс заходів при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом по запобіганню утворенню характерних дефектів для аргонодугового зварювання алюміній-літійєвих сплавів (газової пористості та включень оксидної плівки);
5. Проаналізувати особливості зміни механічних властивостей зварних з'єднань, напружено-деформованого стану та характеру розподілу температури в алюмінієвих сплавах з різним рівнем термічно зміцнення при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом зі швидкістю до 300 см/хв.
6. Розробити методику розрахунку параметрів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів.
7. Визначити можливості створення нових інструментів та обладнання для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом, а також

комбінованих технологій дугового зварювання з використанням стисненої дуги різнополярного асиметричного струму.

Об'єкт дослідження – технологія плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів зі швидкостями, які в два і більше разів перевищують швидкість аргонодугового зварювання неплавким електродом для однакових товщин.

Предмет дослідження – особливості формування геометрії зварного з'єднання, механічних властивостей та структури швів алюмінієвих сплавів при плазмо-дуговому зварюванні.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань і отримання основних результатів дисертаційної роботи було застосовано такі сучасні методи дослідження, як математичне моделювання, а також аналітичні та чисельні методи дослідження розповсюдження тепла в зварних пластинах при різних швидкостях переміщення джерела нагрівання при плазмо-дуговому зварюванні з високими швидкостями; вимірювання геометричних параметрів зварних з'єднань; металографічні дослідження отриманих структур за допомогою оптичної та електронної мікроскопії, а також рентгенофазового аналізу; механічні випробування зварних з'єднань методами статичного і позацентрового розтягування, дослідження напружено-деформованого стану після зварювання.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на створення високоякісних з'єднань алюмінієвих сплавів шляхом застосування плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом із мінімізованою погонною енергією в порівнянні з існуючими процесами зварювання неплавким електродом. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 1) вперше встановлено ефект видалення газових включень з рідкого металу зварювальної ванни за рахунок її коливання низькочастотними (4-6 Гц) пульсаціями струменю плазмоутворюючого газу, який дає однакове з модуляцією зварювальним струмом зменшення у 2 рази кількості пор у порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням без додаткових коливань зварювальної ванни;
- 2) встановлено, що границя міцності та ударна в'язкість при позацентровому розтягуванні вища на 30% у швів алюміній-літійєвих сплавів, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом у порівнянні зі швами, отриманими аргонодуговим зварюванням неплавким електродом, при цьому зразки, отримані з використанням підкладок, мають на 10% вищі показники міцності та ударної в'язкості при одновісному та позацентровому навантаженні у порівнянні зі швами, отриманими без використання підкладних елементів.
- 3) виявлено закономірності впливу швидкості зварювання на зміну механічних властивостей високоміцних алюмінієвих сплавів систем легування Al-5Mg-Mn, Al-3Cu-1,8Li та Al-6Cu-Mn товщиною 2 мм, при цьому встановлено ефект зростання показників міцності зварних з'єднань до досягнення «пікової» швидкості, з їх подальшим спадом, обумовленим погіршенням умов формування зварного з'єднання за рахунок утворення підрізів та збільшення пор в металі шва.
- 4) встановлено, що у алюмінієвих сплавів (Al-6Cu-Mn та Al-3Cu-1,8Li), які термічно зміцнюються, спостерігається стрімке зростання показників міцності

при досягненні «пікової» швидкості зварювання, при цьому зменшення кількості міді в металі шва дозволяє збільшити показник «пікової» швидкості зі 120 см/хв до 200 см/хв;

- 5) виявлено, що залишкові деформації різко зменшуються в декілька разів при досягненні певної пікової швидкості зварювання, значення якої обернено пропорційна товщині зварюваного металу, а подальше збільшення швидкості зварювання не викликає суттєвого зменшення залишкових деформацій;
- 6) запропоновано методика розрахунку основних параметрів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів, яка є оберненою задачею обчислення температури при швидкісному (більше ніж 20 см/хв), зварюванні, яка враховує теплофізичні властивості алюмінієвих сплавів та зміну їх геометрії в залежності від швидкості зварювання.

Практичне значення одержаних результатів. Встановлені в роботі закономірності процесу плазмо-дугового зварювання, а також вимоги до умов їх реалізації, дозволили створити рекомендацій з модернізації обладнання, яке забезпечує з'єднання алюмінієвих сплавів. Практична цінність роботи міститься в наступному:

- 1) розроблені та експериментально перевірені технології плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом за один прохід без розробки крайок листів товщиною до 10 мм алюмінієвих сплавів різного хімічного складу;
- 2) створено плазмотрон оригінальної конструкції із підвищеним ресурсом роботи, який дозволяє здійснювати стабільний процес плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом на струмах до 450 А, на основі якого розроблено та виготовлено лінійку промислових плазмотронів для плазмового точкового зварювання та комбінованого зварювання стисненою дугою неплавкого електроду та плавким електродом без утворення спільної ванни;
- 3) розроблено оригінальну конструкцію плазмового модулю, на базі якого із залученням серійних джерел живлення для аргонодугового зварювання неплавким електродом створені комплекси обладнання для ручного, механізованого та автоматичного плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом;
- 4) результати досліджень використані при створенні промислової технології плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом елементів електричної арматури авіаційних двигунів, а також при виготовленні зразків серійного обладнання для ручного, напівавтоматичного та автоматизованого (роботизованого) плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі особисто автором: проаналізовано та вивчено наукову літературу з теми дисертації, проведено попередні теоретичні дослідження характеристик методів зварювання [3, 10, 20, 23]; проведено низку експериментальних досліджень особливостей процесів зварювання алюмінієвих сплавів із аналізом одержаних результатів [1-2, 4-5, 9, 12-13, 15-19, 21-22, 24-25, 28]; виконано металографічні дослідження і механічні випробування зварних з'єднань [7-8]; проведено чисельне комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану зварених зразків [13]; виконано конструкторські розробки елементів обладнання модульного комплексу для промислового зварювання конструкцій з алюмінієвих сплавів [6, 11, 14, 26-27].

Дисертаційна робота виконана у відділі електротермічних процесів обробки матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України під керівництвом доктора технічних наук, старшого дослідника, завідувача відділом електротермічних процесів обробки матеріалів ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України Коржика В. М. Робота є результатом самостійних досліджень дисертанта.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на наступних національних і міжнародних семінарах, конференціях і форумах, та презентувались у збірках наукових праць: III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології” (25-27 травня 2005р.), ІЕЗ, Київ, 2005; 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing», 6 – 8 June 2006, Kiev, 2006; IV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології” (23-25 травня 2007 р.), Київ, 2007; V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та споріднені технології” (27-29 травня 2009 р.), Київ, 2009; VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та споріднені технології” (25-27 травня 2011 р.), Київ, 2011; VII науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та споріднені технології” (22-24 травня 2013 р.), Київ, 2013; VIII міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та споріднені технології” (20-22 травня 2015 р.), Київ, 2015; Міжнародна конференція «Иновационные технологии и инжиниринг в сварке “PolyWeld-2016”», 26-27 травня 2016 г., Київ, 2016; 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology “Application and Innovation of Modern Welding Technology”, October 20-21, Hangzhou, China, 2020.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 27 наукові праці, у тому числі 13 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у наукометричній базі Scopus), 2 патенти на винахід, 11 тез доповідей у збірках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 190 сторінках, складається із вступу, шести основних розділів, основних висновків, та списку використаних джерел з 101 найменувань. Робота містить 101 рисуноків, 25 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання дослідження, встановлено предмет та об’єкт дослідження, вказано наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, сформульовані основні положення, що винесені на захист.

У першому розділі наведено аналіз особливостей зварювання алюмінієвих сплавів електричною дугою різнополярним асиметричним струмом.

Процес ПДЗ алюмінієвих сплавів виник як продовження аргонодугового зварювання неплавким електродом змінним синусоїдальним струмом. Значний вклад в розробку цих процесів дугового зварювання алюмінієвих сплавів внесли дослідники з ІЕЗ ім. Є.О. Патона, зокрема Д.М. Рабкін і С.М. Гуревич. В 70-х роках ХХ століття в ІЕЗ ім. Є.О. Патона досліджували особливості процесу плазмодугового зварювання алюмінієвих сплавів змінним синусоїдним струмом.

Недоліком даного способу є нестабільність горіння дуги при її переході через нульову лінію від оберненої полярності до прямої, надмірне нагрівання вольфрамового електроду в півперіоді оберненої полярності. Наступним етапом розвитку плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів було використання стислої дуги постійного струму при оберненій полярності, дослідження якої почались під керівництвом В.Є. Патона. Переваги даного процесу: простота виконання обладнання, очищення поверхні алюмінієвих сплавів і зварювальної ванни від включень оксидної плівки. До недоліків цього процесу варто віднести значну ширину зварних швів, підвищену схильність до утворення водневої пористості, значний перегрів електродного вузла плазмотрона, що обумовлює збільшення його габаритів, а також підвищене блукання стислої дуги постійного струму зворотній полярності при малих амплітудних значеннях струму. Розробка наступного покоління джерел живлення з прямокутною формою імпульсів струму для плазмо-дугового зварювання дозволило в широкому діапазоні регулювати амплітуду струму прямої і зворотної полярності, тривалість імпульсів, а також частоту. Як показали роботи В.С. Гвоздецького і М.М. Воропая, близька до прямокутної форма імпульсів зварювального струму спростила процеси збудження дуги неплавкого електроду в напівперіод оберненої полярності при переході через нуль. Поява джерел живлення з можливістю створення амплітудної і широтної асиметрії зварювального струму дало новий імпульс до розвитку плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів.

Завдяки роботам А.Г. Покляцького, І.В. Довбищенко під науковим керівництвом А.Я. Іщенко в 80-90-х роках ХХ століття було створено лабораторне обладнання для плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом та проведено ряд досліджень по зварюванню алюмінієвих сплавів в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя. Роботи Т.М. Лабур дали розуміння характеру поведінки зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів в процесі зародження та розповсюдження тріщин. Проте, дослідження процесу ПДЗ носили переважно фрагментарний характер. Для широкого промислового впровадження потрібно було встановлення впливу комплексу технологічних параметрів ПДЗ на формування з'єднань і їхні характеристики. Тому метою даної роботи стали комплексні системні дослідження фізико-металургійних процесів, що відбуваються при ПДЗ.

Другий розділ присвячено опису методики досліджень, яка включає:

- вибір схеми процесу, створення лабораторного стенду і проведення досліджень фізико-металургійних особливостей ПДЗ;
- розробка методики та початкових умов для чисельних та реальних експериментів по дослідженню температурних полів і напружено-деформованого стану (НДС) зразків при ПДЗ, АДЗНЕ зварюванні;
- створення методики вибору оптимізованих режимів ПДЗ, проведення технологічних експериментів;
- проведення механічних випробувань зварних зразків.

Створений для проведення технологічних експериментів лабораторний комплекс включає: джерело зварювального струму Tetrix 421 AC/DC різнополярного струму (10-420 А); джерело для зварювання плавким електродом TPS-450 (фірми "Fronius", Австрія); плазмодовий модуль FPM; механізм подавання присадного дроту; універсальний складально-зварювальний стіл оригінальної

конструкції зі змінним кутом нахилу для зварювання в різних просторових положеннях; плазмотрон оригінальної розробки; серійні плазмотрони, стандартні дугові пальники для дугового зварювання неплавким електродом.

В якості дослідних матеріалів для зварювання використовували пластини розміром $400 \times 200 \times \delta$ мм ($\delta = 1,8 \dots 15$ мм) зі сплавів систем легування Al-Mg-Mn (АМг5М, АМг6М, АМг6Н), Al-Cu (1201), Al-Mg-Li (1420) та Al-Cu-Li (1460), а також зварювальні дроти Св-АМг6, Св-АМг63, Св-1201, Св-1571 діаметром 1,6 мм. Безпосередньо перед зварюванням з вказаних матеріалів усували окисну плівку хімічним травленням у NaOH і HNO₃ (з промивкою) або механічним шабренням (з пластин).

Металографічні дослідження протравлених зразків із покриттями здійснювали на оптичних мікроскопах МІМ-7, МІМ-8, Neophot-23 при збільшенні до $\times 1000$.

Для механічних випробувань на статичний розрив використовували розривну машину моделі MTS 810. Для визначення ударної в'язкості застосовували маятниковий копер моделі К-5. Для визначення куту статичного вигину зварних зразків використовували пресове обладнання із спеціалізованим оснащенням.

У третьому розділі наведені результати дослідження закономірностей впливу основних технологічних факторів ПДЗ на особливості протікання фізико-металургійних процесів при формуванні зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) стисненої дуги має чітку тенденцію на прямолінійне збільшення напруги з ростом величини струму (рис.1). 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 змінюючи співвідношення між тривалістю протікання струму при прямій та оберненої полярності.

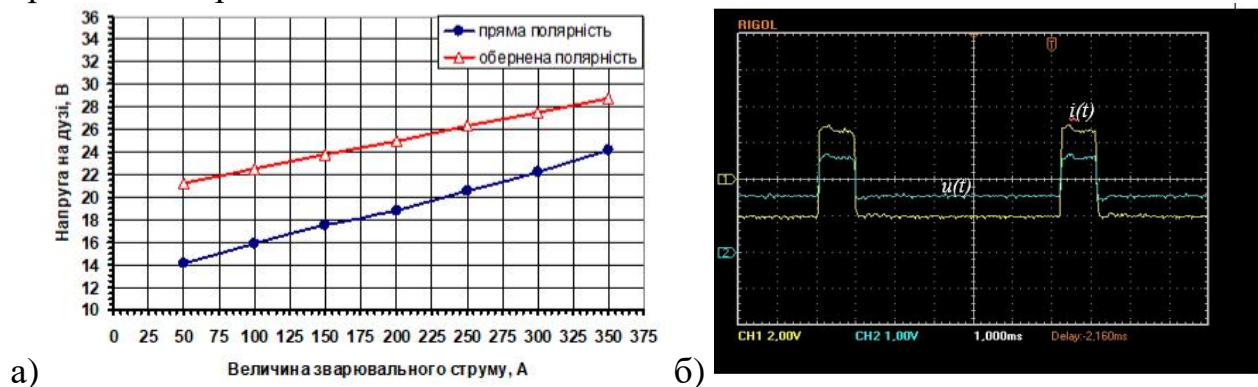


Рис.1. Характерна ВАХ (а) стисненої дуги і типова форма (б) різнополярних імпульсів.

Зростання витрат плазмоутворюючого газу при плазмовому зварюванні алюмінієвих сплавів при незмінних значеннях сили струму, діаметрі каналу плазмоутворюючого сопла, частоті різнополярного струму та його балансі викликає збільшення напруги стисненої дуги до 18%. Збільшення проплавлення при зростанні витрат плазмоутворюючого газу обумовлюється двома факторами: зростання потужності стисненої дуги за рахунок зростання напруги та збільшення силового впливу на рідкий метал ванни саме газової складової внаслідок збільшення швидкості плазмоутворюючого газу (рис.2). Більш швидкісний потік

газу занурює плазмовий струмінь в рідкий метал, зменшує прошарок рідкого металу під плазмовим потоком, тим самим збільшуючи ефективність передавання тепла нерозплавленому металу.

Максимально-допустимі витрати плазмоутворюючого газу, при яких зварний шов формується без дефектів, залежить від величини зварювального струму та об'єму рідкого металу зварювальної ванни.

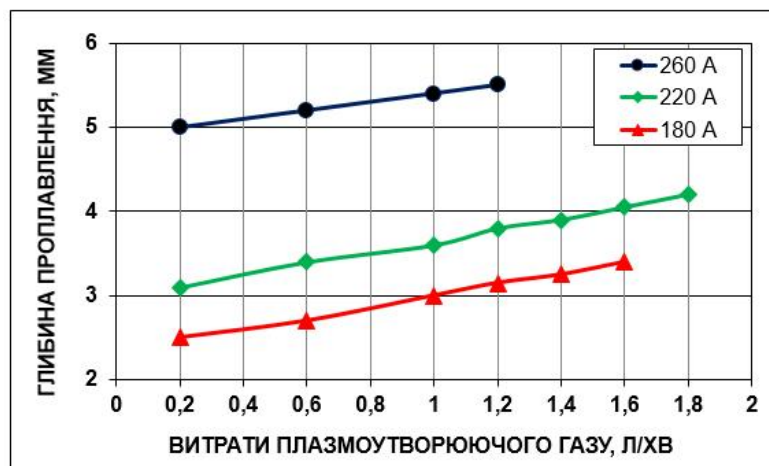


Рис.2. Зміна параметрів проплавлення в залежності від величини сили струму I [А] та витрат плазмоутворюючого газу Q [л/хв] при зварюванні листа товщиною 10 мм при швидкості зварювання 20 см/хв.

При зростанні зварювального струму до 260 А величина максимально допустимих витрат плазмоутворюючого газу зменшується. Це може пояснюватися збільшенням силового впливу електричної складової в загальному силовому впливі на рідкий метал з ростом зварювального струму. При цьому для уникнення дефектів у вигляді порожнин та підрізів витрати плазмоутворюючого газу зменшують. На напругу стисненої дуги також впливають такі конструктивні особливості плазмоутворюючого сопла, як діаметр основного каналу. Збільшення діаметру каналу плазмоутворюючого сопла з 3,2 до 4,2 мм призводить до зменшення напруги на стисненій дузі на 11% при незмінних значеннях зварювального струму. Отже додаткового впливати на геометрію проплавлення можна витратами плазмоутворюючого струму та геометрією плазмоутворюючого сопла.

При плазмовому зварюванні алюмінієвих сплавів зі зростанням частоти різнополярного струму з 50 до 200 Гц глибина проплавлення збільшується більш як у 2 рази (рис.3). Напруга на дузі зростає через збільшення відстані між електродом і поверхнею зварювальної ванни внаслідок заглиблення плазмового струменю в розплавлений метал з ростом частоти струму. Більша частота різнополярного струму обумовлює зменшення ширини шва та збільшення глибини проплавлення металу внаслідок зменшення діаметру активної плями на поверхні зварювальної ванни, збільшення сконцентрованості енергії в активній плямі. Зростання частоти різнополярного струму покращує якість формування зварного з'єднання, що помітно при плазмо-дуговому зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів без підкладки в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя.

При зміщенні балансу різнополярного струму в бік оберненої полярності (зміна балансу від 85% прямої полярності до 50% прямої полярності в діапазоні частот різнополярного струму від 50 до 200 Гц) зростає середнє значення напруги на стисненій дузі і спостерігається зменшення глибини проплавлення в 2 рази (рис.4)., Збільшення ширини шва при плазмовому зварюванні алюмінієвих сплавів зі зміщенням балансу різнополярного струму обумовлено зростанням потужності дуги за рахунок росту середнього значення напруги у порівнянні з процесом плазмового зварювання з переважанням частки прямої полярності.

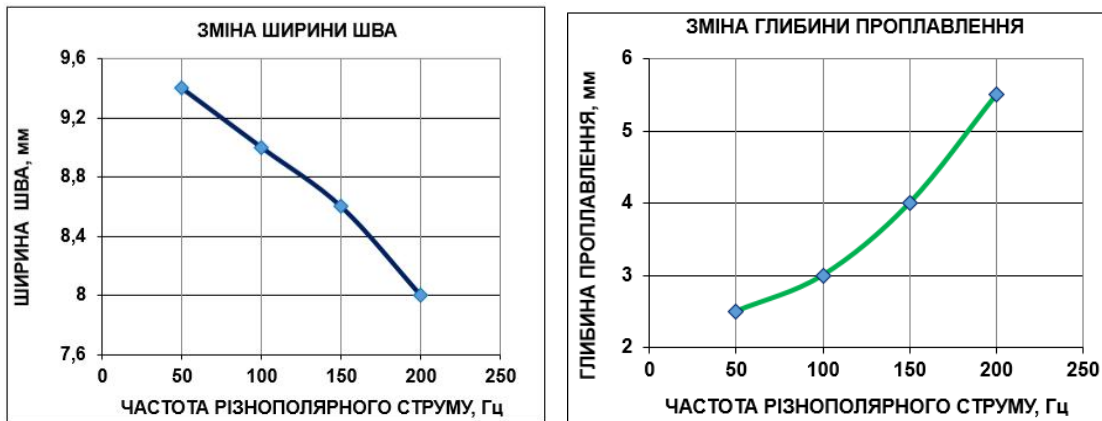


Рис.3. Зміна параметрів проплавлення в залежності від частоти різнополярного зварювального струму.

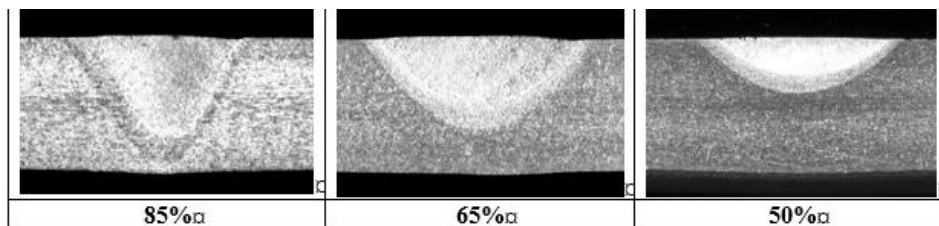


Рис.4. Зміна параметрів проплавлення в залежності від співвідношення між тривалістю горіння дуги прямої та оберненої полярності (сплав АМгб ($\delta=6$ мм) $I=250$ А; $Q_{п.г.}=0,2$ л/хв; $V_{зв} = 40$ см/хв (24 м/год).

Глибина проплавлення може суттєво відрізнитися при досягненні як швидкістю зварювання так і величиною зварювального струму оптимальних значень, необхідних для плавлення алюмінієвого сплаву певної товщини та хімічного складу. При цьому зміна величини зварювального струму впливає на глибину проплавлення сильніше, чим зміна швидкості зварювання (рис.2). Так при зростанні сили струму на 20% глибина проплавлення зростає на 68%, а при зменшенні швидкості зварювання на ті ж самі 20% глибина проплавлення зростає лише на 37%.

При формуванні реального зварного з'єднання крім забезпечення глибини проплавлення необхідно ще забезпечити формування без дефектів у вигляді підрізів та внутрішніх порожнин, тому слід враховувати взаємний вплив декількох параметрів – зі збільшенням сили струму необхідно зменшення витрат плазмоутворюючого газу, частота різнополярного струму має не перевищувати 150 Гц, за умови забезпечення катодного руйнування оксидної плівки на поверхні зварюваних сплавів баланс дуги не має перевищувати 75% прямої полярності.

Аналіз результатів досліджень показав, що формування з'єднань у нижньому положенні необхідно обирати такі рекомендовані параметри плазмо-дугового зварювання: умовна довжина дуги – 6 мм; баланс дуги – 75% прямої полярності; частота різнополярного струму – 150 Гц; витрати плазмоутворюючого газу – 0,3 – 0,4 л/хв. Сила струму, швидкість зварювання та швидкість подавання присадного дроту обирається в залежності від типу сплаву та його товщини з урахуванням технологічних можливостей обладнання.

В четвертому розділі досліджено особливості формування зварних з'єднань із високоміцних алюмінієвих сплавів систем Al-Mg-Mn, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Li, Al-Mg-Li, шляхи управління структурою та мінімізації дефектів, характерних для дугового зварювання, та створено методику розрахунку параметрів ПДЗ.

Для мінімізації утворення внутрішніх пор в швах при ПДЗ алюмінієвих сплавів запропоновано модуляцію частоти струму замінити імпульсним подаванням газу в процесі зварювання. В зону зварювального електроду для утворення плазмового потоку імпульсно подають плазмоутворюючий газ (рис.5) Імпульси газу подаються 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 плазмоутворюючого газу співвідношення максимальних витрат до мінімальних становить 10:1 при рівні мінімальних витрат порядку 0,1 л/хв. Захисний газ при цьому подають неперервно з витратами в межах 25...35 л/хв. Крім того спосіб зварювання з модульованим подаванням плазмоутворюючого газу не впливає на формування верхньої поверхні швів та може використовуватись при швидкостях зварювання до 120 см/хв.

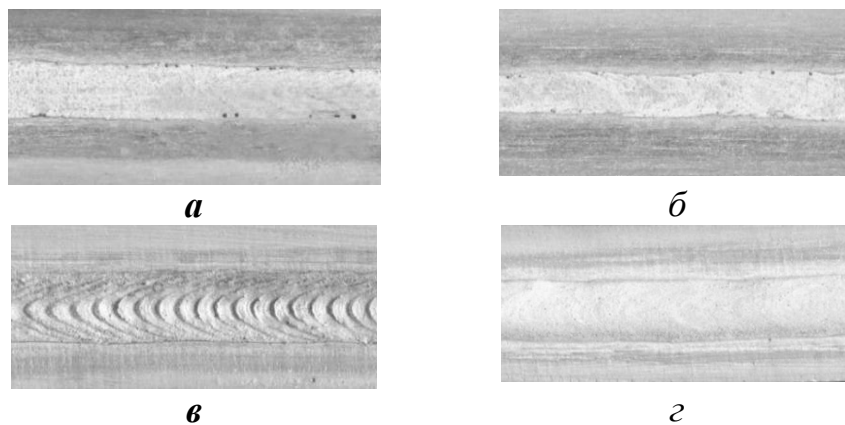


Рис.5. Коренева частина швів модульного зразка зі знятим валиком (а,б) та верхня частина швів (в,г) із сплаву 1460 (Al-3Cu-1,8Li) товщиною 3 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом із модуляцією зварювального струму (а, в) та модульованим подаванням плазмоутворюючого газу (б, г).

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. Для цього спочатку визначають ефективну енергію $q_{\text{ом}}$ [Дж] стисненої дуги, необхідну для плавлення основного металу, за формулою:

$$q_{om} = 4,97 T_{max} v_{sv} c \gamma \delta 2 y / (1 - by^2/2a),$$

де T_{max} – температура плавлення основного металу, °C; v_{zv} – швидкість зварювання, см/с; c – теплоємність матеріалу, Дж/(кг °C); γ – питома вага основного металу, кг/см³; δ – товщина основного металу, см; b – коефіцієнт температуровіддачі, 1/с; y – ½ ширини шва, см; a – коефіцієнт теплопровідності, см²/с.

Після цього визначають енергію q_{pr} [Дж], необхідну для плавлення присадного дроту:

$$q_{pr} = c_{pr} \gamma_{pr} U_{pr} (T_{pr} - T_0) t_p,$$

де T_{pr} – температура плавлення присадки, °C; T_0 – початкова температура, °C, (як правило +20°C); U_{pr} – об'єм присадки, см³; c_{pr} – теплоємність матеріалу присадки, Дж/(кг °C); γ_{pr} – питома вага матеріалу присадки, кг/см³; t_p – час існування ванни у рідкому стані, с.

Наприкінці визначають загальну ефективну енергію q_{Σ} [Дж] стисненої дуги, необхідну для формування з'єднання:

$$q_{\Sigma} = q_{om} + q_{pr}.$$

За графіком рис.6 відповідно розрахованому значенню енергії обирають зварювальний струм I [A]. Оптимізація одержаних результатів досягається шляхом вибору таких заздалегідь оптимізованих параметрів, як: y – ½ ширини шва, см; U_{pr} – об'єм присадки, см³; t_p – час існування ванни у рідкому стані, с.

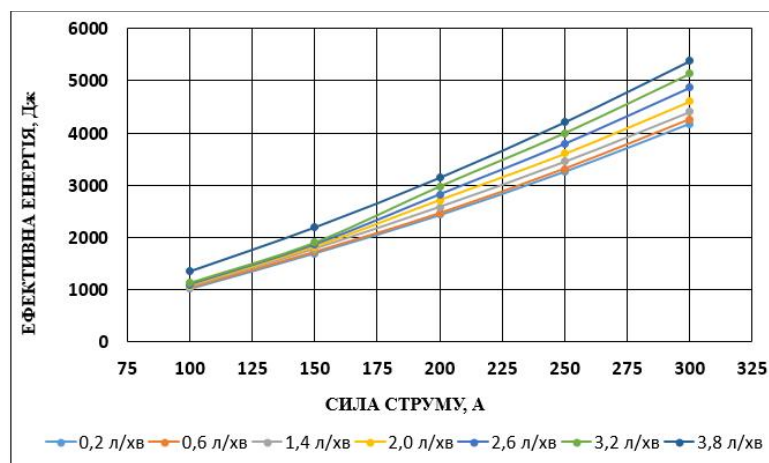


Рис.6. Залежність енергії стисненої дуги q_{Σ} [Дж] від величини зварювального струму I [A]

Дослідна перевірка точності запропонованої розрахункової методики визначення оптимізованих параметрів процесу ПДЗ у нижньому положенні на підкладці показала, що різниця між розрахунковими і експериментальними значеннями зварювального струму не перевищує 2%

В п'ятому розділі дана комплексна оцінка впливу швидкості ПДЗ на механічні властивості, показники довговічності та напружено-деформований стан зварних з'єднань із досліджуваних алюмінієвих сплавів.

Виявлено, що зростання механічних властивостей внаслідок збільшення швидкості зварювання має конкретні обмеження по швидкості. В першу чергу таке обмеження пов'язано з чутливістю алюмінієвого сплаву до перегрівання під час зварювання та його хімічним складом. Сплави, які термічно зміцнюються, чутливі до надмірного нагрівання в процесі зварювання, при цьому у таких сплавів

спостерігається стрімке зростання показників міцності при збільшенні швидкості зварювання. Встановлено, що для кожної системи легування таких сплавів існують «пікові значення» швидкості зварювання, перевищення яких приводить до зменшення показників міцності внаслідок погіршення умов формування та дегазації шва (рис. 7).

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) зразків сплаву АМг5М, АМг6 у відпаленому (АМг6М) та нагартваному (АМг6Н) стані, 1201 дозволили виявити закономірності впливу швидкості зварювання на формування зони пластичних деформацій та силу усадки при виконанні зварного шва (рис. 8).

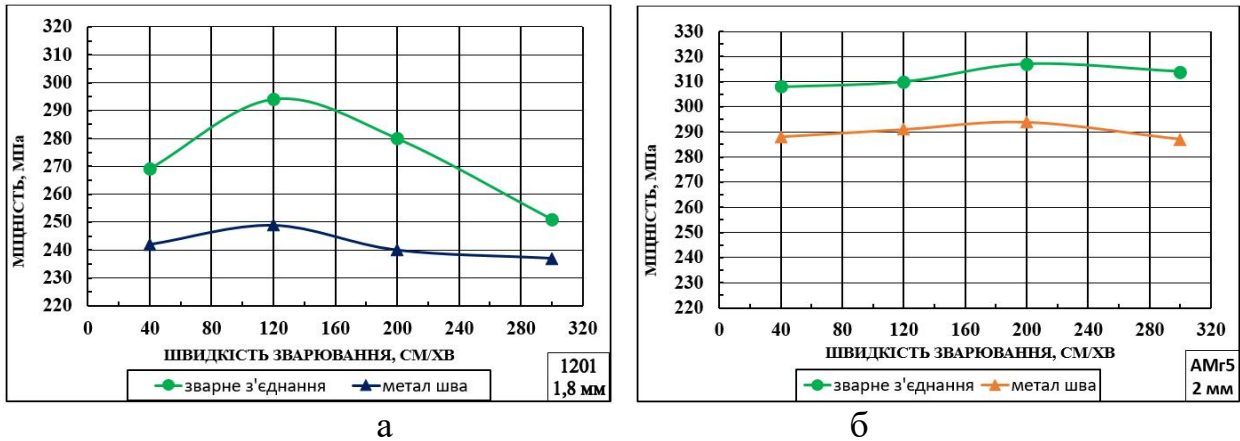


Рис. 7. Графіки зміни показників міцності зварних з'єднань в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом алюмінієвого сплаву 1201, що зміцнюється термічно (а) та алюмінієвого сплаву АМг5М, що термічно не зміцнюється (б).

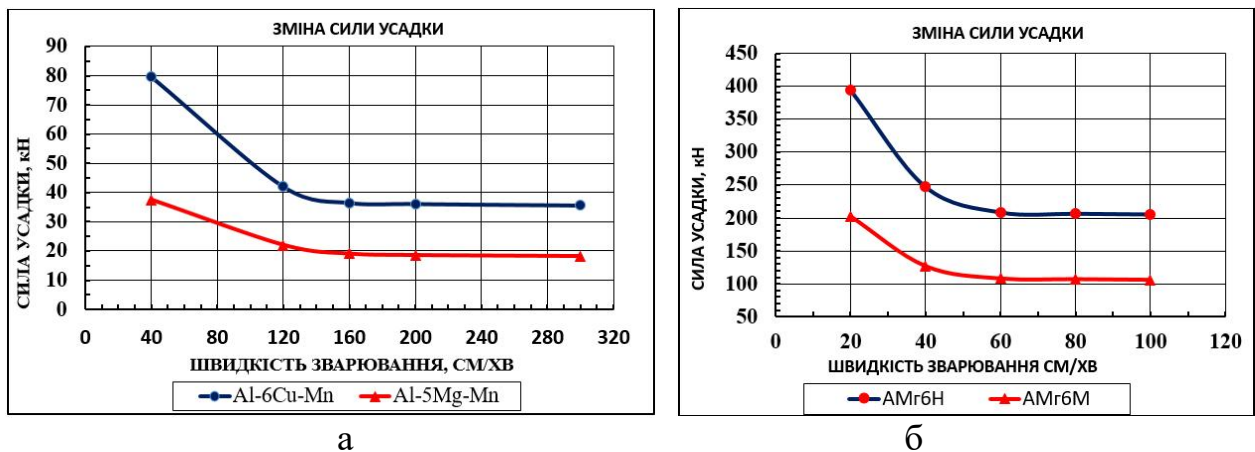


Рис. 8. Графіки зміни показників залишкової деформації в зварних з'єднаннях в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом алюмінієвого сплаву товщиною 2,0 мм (а) та 6,0 мм (б).

Встановлено, що залишкові деформації суттєво зменшуються на початковому етапі зростання швидкості зварювання. При досягненні певного рівня швидкості процес зменшення залишкових деформацій зменшується. Виявлено, що подальше зростання швидкості викликає зміну в рівні залишкових деформацій не більше 1-

2% процентів. Показано, що, в першу чергу такий рівень швидкості обумовлений не показниками міцності досліджених алюмінієвих сплавів, а їх товщиною.

Показники міцності зварних з'єднань, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом на підкладці з формуючою канавкою в середньому на 10% вищі у порівнянні зі зварювання без підкладних елементів в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя. При цьому структура швів, отриманих без підкладки, характеризується меншими розмірами із-за меншого вкладення тепла (для деяких товщин різниця в режимах зварювання може становити до 25 – 30%) (рис. 9)

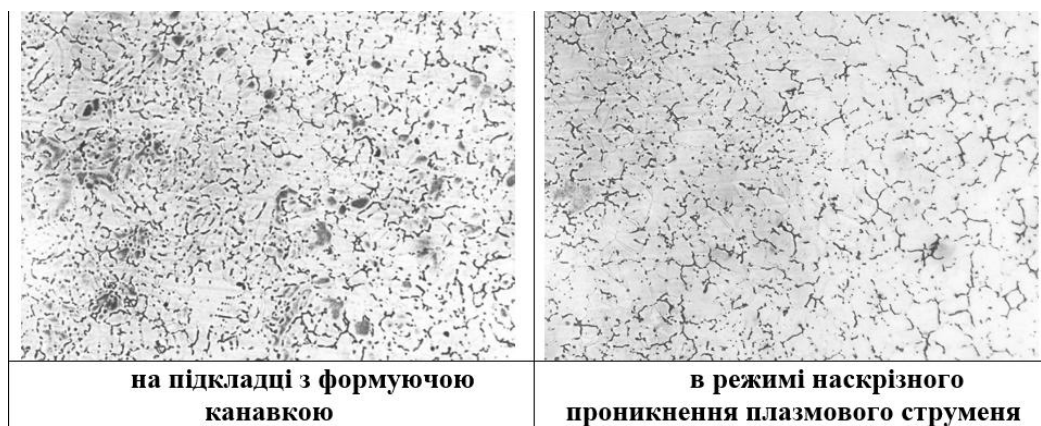


Рис. 9. Метал швів сплаву 1460 (Al-3Cu-1,8Li) товщиною 3мм, плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом при різних умовах формування кореневої частини шва; $\times 200$.

Менші показники міцності зварних з'єднань, отриманих плазмо-дуговим зварюванням без використання підкладних елементів обумовлений формуванням більш різкого переходу від шва до основного металу, з утворенням підрізів по зоні сплавлення, які проходять за стандартами якості, але зменшують міцність шва на 7-10%. Така особливість спостерігається як при одновісному, так і при позацентровому розтягуванні. Тому за можливості слід уникати зварювання без використання підкладних елементів.

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 розробці апаратно-технологічних основ створення обладнання та промислових технологій швидкісного ПДЗ алюмінієвих сплавів. Із використанням отриманих результатів взаємного впливу основних складових процесу плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів, таких як частота різнополярного струму, величина струму, витрати плазмоутворюючого газу та швидкість зварювання на закономірності формування зварних з'єднань розроблені принципи побудови апаратно-технологічної схеми обладнання для швидкісного ПДЗ, які дозволили створити блочно-модульну концепцію створення технологічного комплексу. Так на основі отриманих знань про особливості плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів, отриманих в попередніх розділах роботи, була запропонована апаратна схема та конструкція плазмового модулю

для ручного та автоматичного плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом (рис. 10).

Також попередні дослідження показали доцільність створення більш ефективної конструкції плазмотрона, з точки зору створення промислового обладнання для ПДЗ. Така задача вирішувалася шляхом комп'ютерного моделювання газодинаміки та конструктивних параметрів плазмотрону із використанням системи рівнянь Нав'є-Стокса, доповненої рівнянням для обліку турбулентності, та розрахункового програмного пакету Solidworks Flow Simulatio. Для верифікації результатів розрахунків проводились наступні натурні випробуваннями виготовлених зразків. В результаті було створено універсальний плазмотрон для автоматичного (роботизованого) шовного та точкового, а також комбінованого зварювання (плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів (рис.11, 12).



Рис. 10. Зовнішній вигляд плазмового модуля для ручного та автоматичного плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.

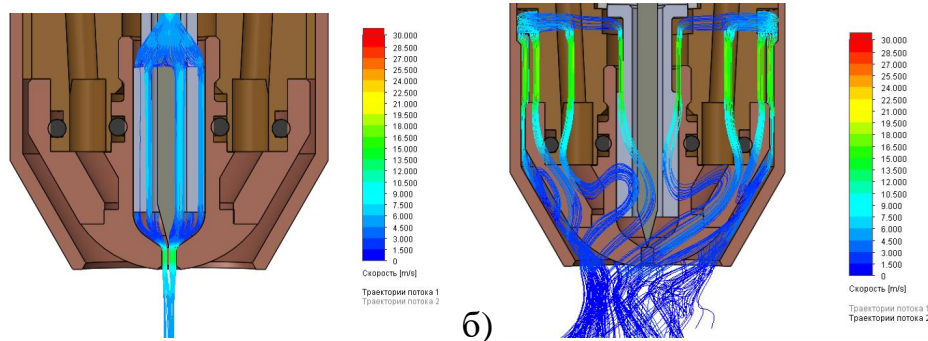


Рис.11. Комп'ютерна модель потоків плазموутворюючого (а) та захисного (б) газу в універсальному плазмотроні для автоматичного шовного та точкового, а також комбінованого плазмо-дугового зварювання.

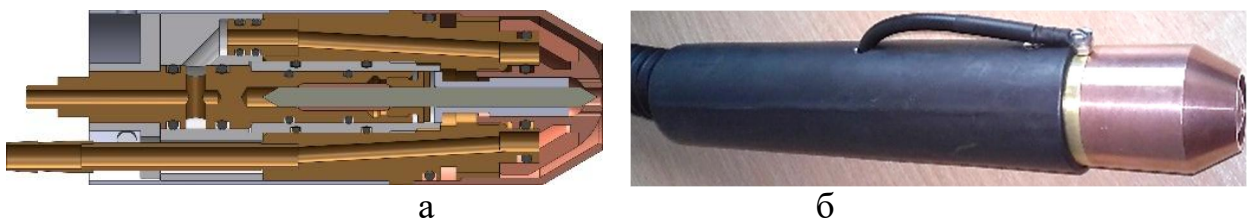


Рис. 12. Комп'ютерна модель (а) та зовнішній вигляд (б) універсального плазмотрону для точкового та шовного зварювання.

На основі проведених досліджень було розроблено технологію комбінованого зварювання стисненою дугою неплавкого електроду різнополярним струмом та імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом постійним струмом оберненої полярності. Таке поєднання дозволяє зменшити на 30% витрати електродного металу у порівнянні з традиційним імпульсно-дуговим зварюванням, зменшити розміщення основного металу, зменшити розміри шва. Процес може бути ефективним при зварюванні за оди прохід з'єднань з розкриттям крайок листів товщиною до 16 мм на швидкості до 50 см/хв.

Здійснено промислове впровадження результатів роботи, в тому числі:

- при створенні та запуску серійного виробництва обладнання для ПДЗ в ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) для ручного автоматичного зварювання, а також в складі роботизованих ліній, із яких два комплекси в даний час експлуатуються на підприємства та організаціях КНР;

- при реалізації промислового технологічного процесу ПДЗ елементів електричної арматури на НВО «Мотор Січ» (м. Запоріжжя, Україна).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. Встановлено, що додатковим шляхом збільшення глибини проплавлення алюмінієвих сплавів окрім збільшення сили струму, є використання частоти різнополярного струму 150 - 200 Гц та збільшення тривалості протікання струму при прямій полярності до 75% від загального часу періоду зварювання.

2. Визначено, що формування зварного з'єднання в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя дозволяє зменшити величину зварювального струму на 40-45 А у порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням на підкладці. При цьому зменшується ширина зварного шва. Для підвищення стабільності горіння стисненої дуги в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя необхідно збільшувати частоту різнополярного асиметричного струму до 150 Гц.

3. Встановлено, що з'єднання алюміній-літійєвих сплавів, отримані плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом, мають вищі на 10-30% показники міцності при статичному та позацентровому навантаженні, ніж зразки, отримані аргонодуговим зварюванням неплавким електродом. При цьому вищі показники мають зразки, отримані з використанням підкладок.

4. Визначено ефект підвищення показників міцності зварного з'єднання при зростанні швидкості плазмо-дугового зварювання до «пікового значення» швидкості зварювання, після досягнення якого спостерігається спад міцності, обумовлений погіршенням умов формування та дегазації шва. Величина «пікового значення» швидкості зварювання залежить від хімічного складу алюмінієвого сплаву, зменшення в складі сплаву міді на 3% викликає збільшення величини «пікової швидкості» зварювання для листів товщиною 2,0 мм зі 120 см/хв до 200 см/хв.

5. Встановлено, що більш ефективним шляхом мінімізації утворення внутрішніх пор в швах при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів є імпульсне (з частотою 4-6 Гц) подавання плазмоутворюючого газу із співвідношенням максимальних витрат до мінімальних 10:1 при рівні мінімальних витрат порядку 0,1 л/хв. При цьому даний спосіб боротьби з газовими порами не викликає погіршення формування поверхні шва, у порівнянні з використанням зварювання з модуляцією зварювального струму.

6. Розроблено методику розрахунку параметрів режиму зварювання з урахуванням швидкості зварювання та теплофізичних властивостей алюмінієвих сплавів.

7. Результати роботи впроваджені в розробку технології зварювання елементів електричної арматури авіаційних двигунів на ПАТ «Мотор Січ», у виробництво серійних зразків обладнання в ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) для ручного та автоматичного (роботизованого) плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом, із яких два комплекси в даний час експлуатуються на підприємства та організаціях КНР.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Покляцкий А.Г. **Гринюк А.А.** Устойчивость процесса плазменной сварки алюминиевых сплавов проникающей дугой. *Автоматическая сварка*. 1999. № 4. С. 42-45. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання.*
2. Ищенко А.Я., Будник В.П. Покляцкий А.Г., **Гринюк А.А.** Влияние состава защитных газов на технологические характеристики дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*. 2000. № 2. С.19-22. *Дисертантом проведено вивчення впливу газів на процес зварювання алюмінієвих сплавів дугою неплавкого електроду.*
3. Покляцкий А.Г. **Гринюк А.А.** Влияние параметров асимметричного и модулированного токов на качество сварных соединений алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2001. № 7. С.33-36. *Дисертант виконував обробку та аналіз результатів. Стаття входить до наукометричної бази Scopus.*
4. Покляцкий А.Г. Ищенко А.Я., **Гринюк А.А.**, Чайка А.А., Федорчук В.Е. Аргонодуговая сварка алюминиевых сплавов неплавящимся электродом с колебаниями дуги. *Автоматическая сварка*. 2002. №2. С. 18 – 22. *(Дисертант виконував експериментальні дослідження) Стаття входить до наукометричної бази Scopus*
5. Покляцкий А.Г., Лозовская А.В., **Гринюк А.А.** Предотвращение образования оксидных плен в швах при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2002. № 12. С. 45 – 48. *(Дисертант виконував експериментальні дослідження) Стаття входить до наукометричної бази Scopus*
6. Лабур Т.М., Покляцкий А.Г., **Гринюк А.А.** Механические свойства сварных соединений алюминий-литиевых сплавов, полученных плазменной сваркой. *Автоматическая сварка*. №6. 2006. С. 40 – 43. *Дисертантом проведено механічні випробування зварних з'єднань.*
7. Покляцкий А.Г., Ищенко А. Я., **Гринюк А.А.**, Яворская М.Р. Механические свойства соединений алюминиевого сплава 1441, полученных при различных способах сварки. *Автоматическая сварка*. 2007. №3. С. 31 – 33. *Дисертантом проведено механічні випробування зварних з'єднань.*
8. Лабур Т.М., **Гринюк А.А.**, Таранова Т.Г., Костин В.А., Покляцкий А.Г. Особенности микромеханизма разрушения соединений алюминий-литиевых сплавов, полученных плазменной сваркой. *Автоматическая сварка*. 2007. №9. С. 11 – 16. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання.*

9. **Гринюк А.А.**, Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А., Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко В.Г. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2015. № 11. С. 31 – 41. *Дисертантом виконано огляд літератури.*
10. **Гринюк А.А.**, Коржик В.Н., Бабич А.А., Ткачук В.И., Пелешенко С.И. Унифицированный плазмотрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом. *Технологические системы*. 2016. № 4. С. 86-89. *Дисертантом запропоновано конструктивне рішення плазмотрону.*
11. Коржик В.Н., Пашин Н.А., Миходуй О.Л., **Гринюк А.А.**, Бабич А.А., Хаскин В.Ю. Сравнительная оценка способов дуговой и гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевого сплава 1561. *Автоматическая сварка*. 2017. № 4. С. 32 – 37. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання.*
12. The impact of consolidation in a rigid tool on the formation of residual stress-strain state of butt joints of plates from an alloy 1561 at MIG, PAW and hybrid PAW-MIG welding / Korzhyk V., Kvasnytskyi V., Khaskin V., Prokhorenko D., Perepychai A., **Grynyuk A.**, Babych O. // *American Scientific Journal*, № (17), Vol.2, 2017. – P. 14 – 29. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання і числове комп'ютерне моделювання НДС.*
13. Коржик В.Н., Войтенко А.Н., Пелешенко С.И., Ткачук В.И., Хаскин В.Ю., **Гринюк А.А.** Разработка автоматического оборудования для изготовления трехмерных металлических изделий на основе аддитивных технологий. *Автоматическая сварка*. 2017. № 5–6. С. 91–98. *Дисертантом запропоновано конструктивні рішення окремих модулів обладнання.*
14. Бабич О.А., Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскин В.Ю., Dong Chunlin, Han Shanguo Гібридне зварювання алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 з використанням плазмової дуги і дуги плавкого електрода (Plasma-MIG). *Автоматичне зварювання*. 2020. № 7. С. 11-22. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання.*
15. Спосіб плазмового зварювання алюмінієвих сплавів з імпульсною подачею газу: пат. 117164 Україна. № 201608285; заявл. 27.07.2016; опубл. 25.06.2018, Бюл. №12. 6 с. *Дисертантом запропоновано ідею імпульсної подачі газу, виконано експерименти зі зварювання.*
16. Спосіб плазмо-дугового зварювання з імпульсною модуляцією струму: пат. 120130 Україна. № 201713002; заявл. 28.12.2017; опубл. 10.19.2019, Бюл. №19. 4 с. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання.*
17. **Гринюк А.А.** Влияние основных параметров процесса плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током на параметры проплавления швов. *Зварювання та суміжні технології* : зб. матеріалів доп. III всеукр. наук.-техн. конф. молодих учених та спеціалістів., м. Київ, 25-27 трав. 2005р. Київ, 2005. С.12. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання і узагальнено їх результати.*
18. Khohlova J., Labur T., **Grynyuk A.** Computer Technologies for Management of Plasma-Arc Welding of Aluminum Alloys and the Physicomechanical Characteristics of Welded Joints. *Computer Technology in Welding and Manufacturing*, 16th International Conference, Kyiv, 6 – 8 June 2006. Kyiv. 2006. – P. 88-89. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання.*
19. **Гринюк А.А.** Преимущества сварки высокопрочных алюминиевых сплавов сжатой дугой. *Зварювання та суміжні технології* : зб. матеріалів доп. IV всеукр.

наук.-техн. конф. молодих учених та спеціалістів., м. Київ, 23-25 трав. 2007 р. Київ, 2007. С.20.

20. **Гринюк А.А.** Влияние скорости плазменно-дуговой сварки на механические свойства и структуру швов сплава АМгб. *Зварювання та суміжні технології* : зб. матеріалів доп. V всеукр. наук.-техн. конф. молодих учених та спеціалістів., м. Київ, 27-29 трав. 2009 р. Київ, 2009. С.20.

21. **Гринюк А.А.** Особенности формирования вертикальных швов при плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов. Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології” (25-27 травня 2011 р.), Київ, 2011. – С. 80. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання і узагальнено їх результати.*

22. **Гринюк А.А.**, Бондарев Е.Г. Выбор способа дуговой сварки для соединения листов сплава АМгб. *Зварювання та суміжні технології* : зб. матеріалів доп. VII міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та спеціалістів., м. Київ, 22-24 трав. 2013 р. Київ, 2013. С. 130. *Дисертантом виконано вибір способу зварювання.*

23. **Гринюк А.А.** Дзюба Н.А. Комбинированная сварка алюминиевых сплавов сжатой дугой разнополярного тока и дугой плавящегося электрода. *Зварювання та суміжні технології* : зб. матеріалів доп. VII міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та спеціалістів., м. Київ, 22-24 трав. 2013 р. Київ, 2013. С.131. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання і узагальнено їх результати.*

24. **Гринюк А.А.**, Сушко Ю.С. Скоростная плазменная сварка разнополярным асимметричным током алюминиевых сплавов различных систем легирования. *Зварювання та суміжні технології* : зб. матеріалів доп. VII міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та спеціалістів., м. Київ, 22-24 трав. 2013 р. Київ, 2013. С.132. *Дисертантом виконано експерименти зі зварювання і узагальнено їх результати.*

25. **Гринюк А.А.**, А.А. Бабич. Универсальный комплекс оборудования для автоматической плазменной сварки. *Зварювання та суміжні технології* : зб. матеріалів доп. VIII міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та спеціалістів., м. Київ, 20-22 трав. 2015 р. Київ, 2015. С.230. *Дисертантом запропоновано конструктивні рішення модулів комплексу обладнання.*

26. **Гринюк А.А.** Коржик В.Н., Бабич А.А., Ткачук В.И., Пелешенко С.И. Унифицированный плазмотрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом. *Инновационные технологии и инжиниринг в сварке “PolyWeld-2016”* : зб. матеріалів доп. міжн. конф., м. Київ, 26-27 трав. 2016 р. Київ, 2016. С. 43-48. *Дисертантом запропоновано конструктивне рішення плазмотрону.*

27. Korzhyk V., Feng Changgen, **Grinyuk A.**, Peleshenko S., Klochkov I., Voitenko O. Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding structures from high-strength steels and aluminium alloys. *Application and Innovation of Modern Welding Technology* : Proceedings of Papers From the 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology “”, Hangzhou, October 20-21. 2020, Hangzhou, China — p.355-373. *Дисертантом розроблена загальна компоновка комплексу обладнання.*

АНОТАЦІЯ

Гринюк А.А. Плазмо-дугове зварювання алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню особливостей процесів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (ПДЗ) алюмінієвих сплавів. Встановлено, що крім основних параметрів, характерних для зварювання постійним струмом, таких як сила зварювального струму, швидкість зварювання та витрати плазмоутворюючого газу, при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом додатковими засобами збільшення глибини проплавлення є частота різнополярного струму та баланс дуги (тривалість протікання струму при прямій полярності). Збільшення частоти різнополярного струму з 50 до 200 Гц дозволяє збільшити глибину проплавлення швів у 2 -2,5 рази. Шви алюміній-літійєвих сплавів, отримані плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом мають, на 30% вищі показники міцності та ударної в'язкості при позацентровому розтягуванні у порівнянні зі швами, отриманими звичайним аргонодуговим зварюванням неплавким електродом. Розроблено заходи боротьби з газовою пористістю при зварюванні алюміній-літійєвих сплавів за рахунок зміни тиску на рідкий метал внаслідок модуляції зварювального струму або імпульсного подавання плазмоутворюючого газу. Встановлено, що більш ефективним, порівняно з модуляцією струму, є імпульсне подавання (з частотою 4-6 Гц) плазмоутворюючого газу із співвідношенням максимальних витрат до мінімальних 10:1 при рівні мінімальних витрат порядку 0,1 л/хв. При цьому зі збільшенням швидкості зварювання до 200 см/хв не спостерігається погіршення формування поверхні шва, яке притаманне зварюванню з модуляцією струму. Визначено вплив швидкості на показники міцності зварних з'єднань алюмінієвих сплавів з різним хімічним складом. Виявлено ефект «пікової» швидкості зварювання – зростання показників міцності з ростом швидкості зварювання до певної величини швидкості зварюванні. Після досягнення «пікової» швидкості спостерігається зниження показників міцності. Для термічно зміцнених сплавів товщиною 2,0 мм ця величина знаходиться в діапазоні від 120 до 200 см/хв. При цьому зменшення кількості міді в основному металі збільшує значення «пікової» швидкості зварювання. Запропоновано комбіноване використання плазмо-дугового зварювання та зварювання плавким електродом для зварювання алюмінієвих сплавів товщиною до 16 мм за один прохід з розробкою крайок. Виконано промислове впровадження результатів роботи при виготовленні ПДЗ елементів електричної арматури на ПАТ «Мотор-Січ» (Україна), а також у серійному виробництві в ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) обладнання для ручного, автоматичного (роботизованого) плазмо-дугового зварювання, із яких два комплекси в даний час експлуатуються на підприємствах та організаціях КНР.

Ключові слова: плазмо-дугове зварювання асиметричним різнополярним струмом, алюмінієві сплави, присаджувальний дріт, швидкість, підкладка, механічні властивості з'єднань, структури, внутрішні пори, обладнання, комбіноване зварювання.

ABSTRACT

Gryniuk A. Plasma-arc welding of aluminum alloys with multipolar asymmetrical current. – Manuscript.

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.03.06 – welding and related processes and technologies –The Paton Welding Institute NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to research features of processes of plasma - arc welding by multipolar asymmetrical current (PAW) of aluminum alloys. It is established that in addition to the basic parameters that are typical for DC welding, such as welding current, welding speed and plasma gas flow, in plasma-arc welding with multipolar current, additional means of increasing the penetration depth are the frequency of multipolar current and arc balance (flow duration of direct polarity). Increasing of the frequency of multipolar current from 50 to 200 Hz allows to increase the penetration depth of the welds in 2 -2.5 times. Welds of aluminum-lithium alloys obtained by plasma arc welding with multipolar current have 30% higher strength and toughness in eccentric tensile compared to the welds obtained by conventional tungsten inert gas welding. Measures to eliminate gas porosity in the welding of aluminum-lithium alloys were developed by changing the pressure on the liquid metal due to modulation of the welding current or pulsing supply of plasma gas have been developed. It was found that pulse supply (with a frequency of 4-6 Hz) of plasma gas with a ratio of maximum flow to minimum 10: 1 at a level of minimum flow of the order of 0.1 l / min is more efficient than current modulation. In this case, with the increase of welding speed up to 200 cm / min, there is no deterioration in the formation of the weld surface, which is inherent in welds with current modulation. The influence of welding speed on the strength of welded joints of aluminum alloys with different chemical composition is determined. The effect of "peak" welding speed is revealed, consist in the increasing of strength indexes with increasing welding speed to a certain value. After reaching the "peak" speed, there is a decrease in strength. For heat-strengthened alloys with a thickness of 2.0 mm, this value is in the range from 120 to 200 cm / min. The decrease in the amount of copper in the main metal increases the value of the "peak" welding speed. The combined usage of plasma arc welding and gas metal arc welding for joining aluminum alloys up to 16 mm of thickness at one pass with the treatment of edges is proposed. The industrial implementation of the results of work in the manufacture of plasma arc welding of elements of electrical fittings at PJSC "Motor-Sich" (Ukraine), as well as in serial production in LLC "RPS "PLAZER" (Ukraine) equipment for manual, automatic (robotic) plasma arc welding, including two complexes which are currently operated by enterprises and organizations of the PRC.

Keywords: plasma-arc welding with asymmetric multipolar current, aluminum alloys, filler wire, speed, substrate, mechanical properties of joints, structures, internal pores, equipment, combined welding.