

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

БАБИЧ

Олександр Анатолійович



УДК 621.791.754.2

**ГІБРИДНЕ ПЛАЗМОВО-ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ З КОАКСІАЛЬНИМ
РОЗМІЩЕННЯМ ДУГИ ПЛАВКОГО ЕЛЕКТРОДУ**

Спеціальність 05.03.06
Зварювання та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук
Коржик Володимир Миколайович
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України,
завідуючий відділом №21

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Перемітько Валерій Вікторович
Дніпровський державний технічний університет,
декан металургійного факультету

кандидат технічних наук, доцент
Сливінський Олексій Анатолійович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», Інститут матеріалознавства та
зварювання ім. Є.О. Патона,
доцент кафедри зварювального виробництва

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 10⁰⁰ 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 розіслано «19» березня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01,
к.т.н., с.н.с.



Є.В. Шаповалов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток наземного, повітряного і морського швидкісного транспорту обумовлює необхідність застосування інноваційних високопродуктивних технологій одержання зварних з'єднань вуглецевих, легованих сталей і складнолегованих алюмінієвих сплавів. Це пов'язано із низкою недоліків, характерних для традиційних зварювальних процесів. Так, у разі застосування зварювання з дугою плавкого електроду (MIG зварювання) відбувається значний перегрів електродного металу, що призводить до часткового вигорання легуючих елементів алюмінієвих сплавів і, як наслідок, зниження міцності отриманих з'єднань. Крім того, при MIG зварюванні формуються достатньо широкі шви і мають місце значні залишкові деформації. У разі застосування зварювання з дугою неплавкого електроду (TIG зварювання) знижується продуктивність і також мають місце значні залишкові деформації. Обидва розглянуті процеси вимагають попередньої розробки крайок, що також ускладнює одержання з'єднань.

Одним зі шляхів усунення зазначених недоліків є застосування плазмового зварювання. Проте, цей процес також має власні недоліки. Підвищена інтенсивність енергії та осьова концентрація тиску (ефект «замкової шпарини») призводять до виникнення дефектів формування швів (зокрема, подрізів, кореневих дефектів, нерівномірного формування верхнього валика підсилення) і наявності внутрішньої пористості. Високі вимоги до підготовки крайок і точності складання під зварювання.

Низкою дослідників, зокрема І.В. Кривцуном, Н. Топ, W. Esser, M. Tanaka показано, що у разі поєднання плазмового і MIG зварювання в межах спільного гібридного процесу виникає можливість покращення одержуваних результатів за рахунок одночасного локального підігріву зварюваних крайок плазмовою дугою із формуванням шва MIG-процесом. При цьому сформований шов може також підігріватися (додатково оплавлятися) плазмовою дугою, що покращує його формування і усуває ризик виникнення подрізів зі збільшенням швидкості зварювання. Все це робить створення технологій гібридного плазмо-дугового зварювання (Plasma-MIG) актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України відповідно до планів фундаментальних і прикладних робіт за такими темами: «Розробка конструкції плазмотрону для гібридного плазмового зварювання плавким електродом з осьовою подачею електродного дроту» (01.01.2016-31.12.2016); (№ ДР 0118U005294) «Підвищення ресурсу зварних промислових і транспортних конструкцій шляхом розробки та застосування комбінованої технології «швидкісне гібридне плазмове зварювання струмопровідним дротом + електродинамічна обробка» (Цільова програма наукових досліджень НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2) затвердженої постановою Президії НАН України від 16.12.2015 № 293 , постановою Президії НАН України від 20.01.2016 № 12 та розпорядженням Президії НАН України від 05.04.2016 № 208); (№ ДР 0117U001186) «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» (1.6.1.1.21.31(21/31)

2017-2021 р.р. Зазначені науково-дослідні роботи, виконавцем та відповідальним виконавцем яких був здобувач, стали основою для підготовки і представлення даної дисертації.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – розширення технологічних можливостей отримання якісних з'єднань з високими механічними властивостями і створення комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом шляхом встановлення закономірностей протікання фізичних та металургійних процесів під час взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів одна з одною, а також зі сталями і алюмінієвими сплавами, що зварюють гібридним плазмово-дуговим способом.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні завдання:

1. Аналіз технологічних особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.
2. Створення експериментального комплексу обладнання для вивчення фізичних та металургійних процесів при гібридному плазмово-дуговому зварюванні із високошвидкісною відео реєстрацією процесів у дуговому проміжку та реєстрацією електричних параметрів обох дуг.
3. Прогнозування взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного плазмово-дугового зварювання з використанням математичного моделювання. Дослідження впливу параметрів режиму зварювання на формування зварних швів зі сталей та алюмінієвих сплавів.
4. Відпрацювання режимів гібридного плазмово-дугового зварювання легованих сталей і алюмінієвих сплавів, аналіз їх напружено-деформованого стану та механічних характеристик.
5. Розробка та практичне застосування дослідно-промислового обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, для отримання зварних швів деталей товщинами до 12 мм за один прохід в тому числі без розробки крайок.

Об'єкт дослідження – гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом сталей і алюмінієвих сплавів.

Предмет дослідження – фізичні та металургійні процеси при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань і отримання основних результатів дисертаційної роботи використовувались такі сучасні методи дослідження, як: високошвидкісна відео реєстрація процесів що відбуваються в дуговому проміжку та реєстрація електричних параметрів дуг плавкого і неплавкого електродів; математичне моделювання, а також аналітичні і числові методи аналізу фізичних явищ, які супроводжують процеси гібридного плазмово-дугового зварювання легованих сталей і алюмінієвих сплавів; візуальні та хронографічні методи контролю; оптичне і механічне вимірювання геометричних параметрів зварених зразків; металографічні дослідження одержаних структур і визначення долі вигорання легуючих елементів за допомогою оптичної мікроскопії, спектрального аналізу; мікродюрOMETричний аналіз; вимірювання напружено-деформованого стану зварених зразків шляхом спекл-інтерферометрії.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на забезпечення потрібних механічних властивостей і хімічного складу з'єднань алюмінієвих сплавів, вуглецевих і легованих сталей одержаних гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1) встановлені умови циклічного переміщення анодної плями на кільцевому неплавкому електроді коаксіального плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, шляхи управління процесами газодинаміки плазмоутворюючого газу;

2) встановлено, що за рахунок впливу плазмової дуги оберненої полярності на дугу плавкого електроду та при величині постійного струму дуги плавкого електроду до ~ 180 А спостерігається крупнокрапельне перенесення металу без розбризкування з частотами 20-50 Гц, з підвищенням сили струму дуги плавкого електроду спостерігається тенденція переходу до дрібнокрапельного і струменевого переносу;

3) отримало подальший розвиток дослідження умов одержання глибокого проплавлення сталей і алюмінієвих сплавів, а також пониження схильності до утворення внутрішніх пор та несплавень металу плавкого електроду з основним металом за рахунок впливу плазмової дуги на зварюваний метал, стиснення нею дуги плавкого електроду і заглиблення останньої в зварювальну ванну;

4) встановлено що при близьких значеннях погонних енергій у разі гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвих сплавів вигорання легкоплавких елементів зменшується порівняно з MIG процесом (Mg на 5%, а Mn майже на 15%). При цьому на 15-25% зменшується розмір зони термічного впливу і на 5-15% підвищується межа міцності швів;

5) отримало подальший розвиток дослідження напружено-деформованого стану з'єднань, отриманих при гібридному зварюванні з використанням плазмової дуги та дуги з плавким електродом, показано зниження залишкових деформацій у зварних з'єднаннях з алюмінієвих сплавів, порівняно із аналогічними параметрами для випадку дугового MIG зварювання.

Практичне значення. Встановлені в роботі закономірності гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів, а також вимоги до промислових конструкцій з цих матеріалів, дозволили створити гібридний пальник з інноваційними конструктивними елементами і нову систему керування джерелами живлення. Практична цінність роботи міститься в наступному:

1) для дослідження фізичних явищ, що виникають при взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів в гібридному плазмово-дуговому процесі, створено експериментальний комплекс з високошвидкісною відео реєстрацією процесів та реєстрацією електричних параметрів дуг, який дозволив встановити розмір крапель електродного дроту і частоту їх перенесення, проаналізувати поведінку дуги плавкого електроду, а також виявити вплив плазмоутворюючого газу на блукання анодної плями по кільцевому аноду;

2) за результатами досліджень фізичних і металургійних особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом сталей типу 09Г2С, AISI304 і алюмінієвих сплавів АМг6, 1561, 5083, 7075 товщиною до 8 мм обрано параметри технологічних режимів за умов досягнення швидкості до 60 м/год., які для алюмінієвих сплавів забезпечують міцність (σ_B) $\sim 85-95\%$ і відносне видовження до

80% від показників основного металу у сполученні із залишковими деформаціями приблизно на 20-40% меншими за такі для MIG зварювання;

3) встановлена залежність співвідношення струмів плазмової дуги і дуги неплавкого електроду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні від теплопровідності зварюваного металу, так у разі зварювання сталей (менша теплопровідність) струм MIG дуги може на 10-30% перевищувати струм плазми, а у разі зварювання алюмінієвих сплавів (більша теплопровідність) струм MIG дуги може на 10-30% бути нижчим за струм плазми;

4) встановлені технологічні переваги гібридного плазмово-дугового зварювання порівняно із дуговим та плазмовим процесами, зокрема відсутність розбризкування електродного металу, глибоке проплавлення без утворення ефекту «замкової шпарини», можливість зварювання пластин нержавіючої сталі товщиною 12 мм за один прохід без розробки крайок із погонною енергією до 3500 Дж/мм;

5) для реалізації розроблених технологічних підходів гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів створено гібридний плазмотрон з кільцевим неплавким електродом прямого водяного охолодження зі вставкою з тугоплавкого композитного матеріалу і завихрювачем плазмоутворюючого газу, а також системою захисту зварювальної ванни і гарячої ділянки сформованого шва ламінарними газовими потоками;

б) створено комплекс обладнання гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів з єдиною системою керування, яка дозволяє синхронізувати роботу джерел живлення, маніпуляторів та периферійного обладнання для автоматизації і гнучкого налаштування зварювального циклу;

7) розроблені технології однопрохідного гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом елементів судових конструкцій зі сталей і алюмінієвих сплавів товщиною до 10 мм для використання на судноверфі Guangzhou Shipyard International (м. Гуанчжоу, КНР), за якими виготовлено і передано для подальших випробувань дослідно-промислому партію виробів.

Теоретичні положення і практичні рекомендації з гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів можуть бути використаними у навчальному процесі при підготовці студентів і аспірантів технічних спеціальностей.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі авторові належать: постановка мети і обґрунтування задач дослідження, вибір наукових підходів до їх вирішення, аналіз особливостей і тенденцій розвитку технологій гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей та алюмінієвих сплавів [7-13, 15], постановка і розв'язання математичних задач плавлення електродного дроту за наявності оточуючої плазмової дуги і визначення впливу дуги плавкого електроду на ВАХ плазмової дуги [1-3], виконання розрахунків для вибору режимів і визначення НДС [4-5], підготовка обладнання і проведення досліджень, порівняння одержаних практичних і розрахункових результатів [4-5, 7-11, 13], конструювання обладнання [6, 12, 14]. Шляхом поєднання розрахункового підходу з експериментальними дослідженнями і літературними даними автором розроблені технологічні прийоми гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів, що дозволяють підвищувати механічні характеристики одержуваних

з'єднань із одночасним зменшенням їх собівартості за рахунок збереження вмісту легуючих елементів в швах.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертації докладалися і обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях і семінарах:

- 70-th International Institute of Welding, June 26-30, 2017, Shanghai, China;
- PolyWeld–2019: збірник тез доповідей міжнародної конференції «Іноваційні технології та інжиніринг у зварюванні», „КПІ імені Ігоря Сікорського”, 2019, Київ, Україна;
- Proceedings of IEEE 58th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (RTUCON), 12-13 October 2017, Riga, Latvia;
- Презентація по новим матеріалам і технологіям зварювання між країнами СНД і районом високотехнологічних новітніх виробництв у м. Чжаоцін 2017 року, 22-25 травня 2017, м. Чжаоцін, КНР;
- Виставка-конференція з лазерної техніки і технології, 19.09.2017, м. Гуанчжоу, КНР;
- Форум-саміт галузі морських матеріалів, 2 сесія, 18-19.06.2017, м. Далянь, КНР;
- Зустріч-презентація зарубіжних спеціалістів і проектів, 27-29.09.2016, м. Лонгян, КНР;
- Міжнародна науково-технічна конференція «Іноваційні промислові матеріали для морських технологій», 23-25.06.2016, м. Ухань, КНР;
- DISTC: DongGuan International Science and Technology Cooperation Week, 11-12.12.2015, DongGuan, China;
- VIII міжнародна конференція молодих учених і спеціалістів «Зварювання і споріднені технології», 20-22 травня 2015 р., ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ, Україна.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 17 робіт, з них 15 публікацій (3 у бібліографічній і реферативній базі даних Scopus, 9 у фахових виданнях, що входять до переліку ДАК України), 2 патенти України.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 186 сторінок, містить 31 таблицю, 90 рисунків, список літератури з 171 найменування на 18 сторінках і 1 додаткіу.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи і визначено основні завдання досліджень, описано об'єкт і методи досліджень, зазначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок автора.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану досліджень і тенденцій розвитку технологій і обладнання гібридного плазмово-дугового зварювання. В останнє десятиріччя проблема зварювання сталей і алюмінієвих сплавів вирішується за рахунок використання гібридних технологій, зокрема таких, що поєднують переваги плазмового і дугового способів зварювання. Для цього в одній зварювальній ванні концентрують енергію стисненої дуги неплавкого електроду і дуги з плавким електродом. Дану технологію називають гібридним плазмово-дуговим зварюванням з плавким електродом. Цей процес більш відомий у світі під назвою Plasma-MIG.

Процес Plasma-MIG зварювання було запропоновано у 1970-х роках групою дослідників з лабораторії фірми Philips (A. Christinus, H.J. Liei'kens, W.G. Essers). Проте через використання неплавкого електроду традиційної форми процес виявився недостатньо ефективним. Згодом низкою дослідників (A.F. Manz, W.A.J. Brabader) було запропоновано використати більш прогресивну конструкцію гібридного плазмотрону. Подальші дослідження, які проводилися в останнє десятиріччя, були спрямовані на ретельне дослідження окремих складових процесу та його поведінки в цілому (T.S. Tanaka; S.B. Mamat; M.Y. Mahani). Можливість використання даного процесу для зварювання сталей і алюмінієвих сплавів виникла в тому числі завдяки роботам, проведеним в ІЕЗ ім. Є.О. Патона такими дослідниками, як І.В. Кривцун, В.М. Сидорець, та українськими дослідниками Н.О. Макаренко, К.О. Кондрашов та ін. В цих роботах показано, що підґрунтям для подальшої оптимізації технологічних чинників процесу є вивчення його фізичних та металургійних особливостей.

Тому мета даної роботи полягає у розширенні технологічних можливостей отримання якісних з'єднань з високими механічними властивостями і створення комплексу обладнання для гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом шляхом встановлення закономірностей протікання фізичних та металургійних процесів під час взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів одна з одною, а також зі сталями і алюмінієвими сплавами, що зварюють гібридним плазмо-дуговим способом. При цьому підвищувати якість таких з'єднань доцільно за рахунок поєднання переваг обох складових гібридного процесу із одночасним нівелюванням їх недоліків за рахунок взаємного впливу одне на одне і на зварюваний матеріал. Зокрема, завданням роботи є досягнення зниження погонної енергії та покращення розподілу легуючих елементів в швах, що можна забезпечити за умов використання саме гібридного плазмово-дугового зварювання.

Другий розділ присвячено опису обладнання та методів виконання досліджень, який включає:

- створення експериментального стенду із високошвидкісними відео реєстрацією процесів, що відбуваються в дуговому проміжку та реєстрацією електричних параметрів двох зварювальних дуг для проведення фізичних досліджень поведінки плазмової дуги і дуги плавкого електроду, а також їх впливу одна на одну та на формування зварного з'єднання;
- опис методів проведення механічних випробувань зварних зразків;
- опис методів виконання чисельних і фізичних експериментів по дослідженню напружено-деформованого стану зразків при гібридному Plasma-MIG і MIG зварюванні;
- опис методів проведення металургійних досліджень.

Створений експериментальний комплекс для вивчення фізичних та металургійних процесів при гібридному плазмово-дуговому зварюванні включає: джерело зварювального струму Tetrix 421 AC/DC; джерело живлення для зварювання плавким електродом TPS-450 (фірми "Fronius", Австрія); плазмовий модуль FPM (фірми "Fronius", Австрія); механізм подавання електродного дроту; універсальний складально-зварювальний стіл зі змінним кутом нахилу для зварювання в різних просторових положеннях; дослідний плазмотрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом оригінальної розробки (рис. 1 а, б); стандартні дугові пальники для дугового зварювання в захисних газах плавким та неплавким

електродами; систему високошвидкісної відео реєстрації та реєстрації електричних параметрів дуг. Остання система включала в свій склад: швидкісну відеокамеру (pro.dimax HS з частотою запису 2277...46746 к/с); систему осцилографування електричних сигналів (складається з двох датчиків LEM LA 305-S/SP19 для струмів до 500 А і двох датчиків LEM LV 25-200 для напруги до 200 В); блок збору даних зі встановленим АЦП National Instruments PXIe-6363 (16 каналів, 2 МГц/канал); систему керування комплексу, зі спеціалізованим програмним забезпеченням (рис.1, б), розробленим для цього комплексу.

В якості дослідних матеріалів для зварювання використовували пластини розміром 400×200×δ мм (δ=5...10 мм) зі сталей 09Г2С, AISI 304L і алюмінієвих сплавів системи легування Al-Mg-Mn (АМг6, 1561, 5083, 7075), а також зварювальні дроти Св-08Г2С, ER308L, Св-АМг6, ER5183, ER5356 діаметром 1,2-1,6 мм. Безпосередньо перед зварюванням з матеріалів на основі алюмінію усували окисну плівку хімічним травленням у NaOH і HNO₃ (з промивкою) або механічним шабренням (з пластин).

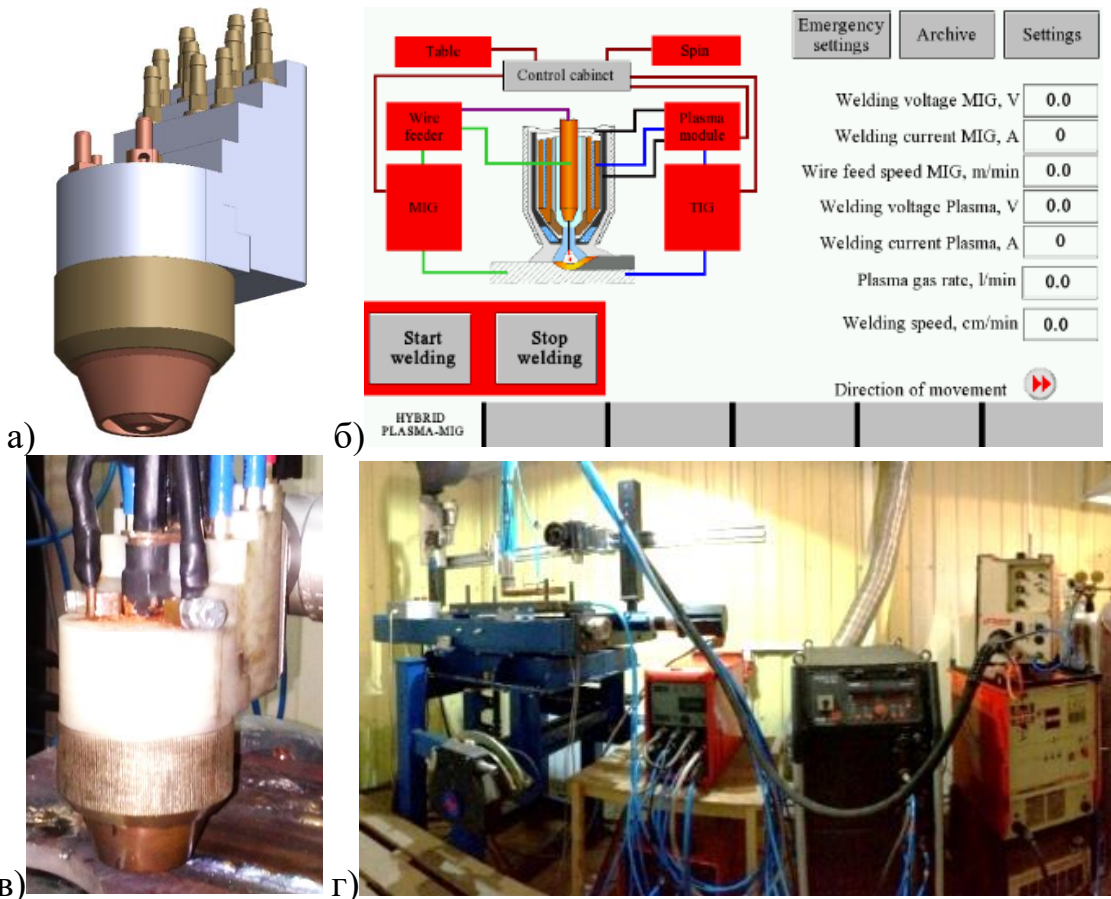


Рисунок 1. 3Д модель (а) та зовнішній вигляд (в) дослідного плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом; меню системи керування (б) та зовнішній вигляд (г) експериментального комплексу для вивчення процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

Металографічні дослідження протравлених зразків здійснювали на оптичних мікроскопах МІМ-7, МІМ-8, Neophot-23 при збільшенні до x1000. Мікротвердість вимірювали на приладі LECO M-400, а також на оптичному мікроскопі POLIVAR із приставкою DORAMET-1000, при навантаженні 20-200 г. Для механічних випробувань на статичний розрив використовували розривну машину моделі МР-200.

В третьому розділі наведено теоретичне прогнозування та експериментальні дослідження взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного Plasma-MIG зварювання плавким електродом. Для цього згідно з електричною схемою процесу (рис.2) створено математичну модель взаємодії стисненої плазмової дуги та дуги з плавким електродом при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом.

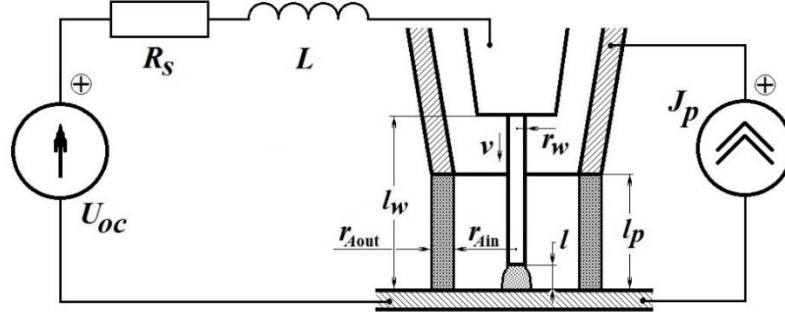


Рисунок 2. Ланцюг електричного живлення процесу гібридного плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом.

Згідно даної моделі динаміка плавлення електроду описується диференціальним рівнянням, суть якого полягає в тому, що швидкість зміни довжини електроду еквівалентна різниці швидкостей V плавлення і подавання електроду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\pi r_w^2 U_a i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 q} - v \quad (1)$$

де $q = c(T_m - T_0) + \lambda$.

Згідно закону Кірхгофа, U_{oc} напруга на джерелі живлення розімкнутого ланцюга еквівалентна сумі падінь напруги на елементах ланцюга (рис.2) — активному опорі R_s та індуктивності L джерела живлення і з'єднувальних кабелів, активному опорі вильоту електроду і падіння напруги на дузі $E \cdot l$ (E — напруженість електричного поля в дузі)

$$U_{oc} = R_s i + L \frac{di}{dt} + \rho \frac{l_w - l}{\pi r_w^2} i + El + U_a + U_k \quad (2)$$

де U_k — катодне падіння напруги.

Рівняння (1) і (2) складають систему нелінійних диференціальних рівнянь що описує динаміку системи «джерело живлення – дуга плавкого електроду» в процесі гібридного Plasma-MIG зварювання

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = \frac{\pi r_w^2 U_a i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 q} - v \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left(U_{oc} - R_s i - \rho \frac{l_w - l}{\pi r_w^2} i - El - U_a - U_k \right) \end{cases} \quad (3)$$

Для отримання вольт-амперної характеристики плазмового розряду при гібридному Plasma-MIG зварюванні (рис.3, а) використали параметричну залежність напруги плазмового розряду від його струму для цього процесу:

$$U_{PlasmaMIG}(i_\theta) = U(i_\theta) \left(1 + \frac{P_v + P_w}{P_\theta} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$I_{PlasmaMIG}(i_\theta) = i_\theta \left(1 + \frac{P_v + P_w}{P_\theta} \right)^{1/2} \quad (5)$$

де P_v – потужність примусової конвекції, P_w – потужність нагрівання електродного дроту радіацією плазмового розряду, P_θ - вихідна потужність стовпа плазми.

Порівняння розрахункової та дослідної вольт-амперних характеристик плазмового розряду в процесі Plasma-MIG зварювання показало (рис.3,б), що розрахункові результати корелюють з дослідними, а похибка при розрахунках складає не більше 7%. Розрахункові прогнози і дослідження впливу на напругу на плазмовій дузі витрат захисного газу і швидкості подавання електродного дроту також корелюють з результатами дослідів. Вони свідчать про збільшення напруги на 1-3 В в обох випадках.

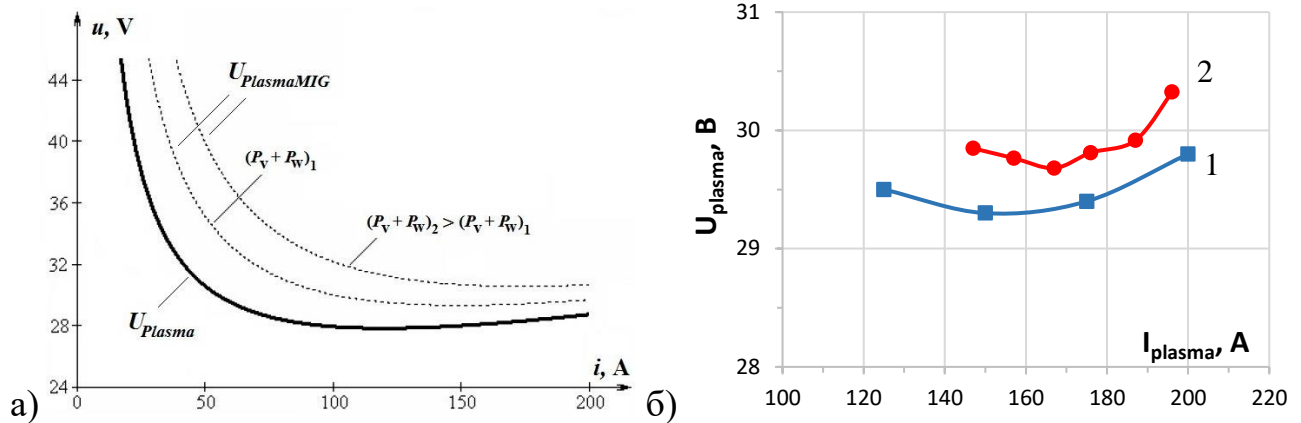


Рисунок 3. Порівняння вольт-амперних характеристик: а) – плазмовий розряд в гібридному плазмово-дуговому процесі (пунктирні лінії); плазмовий розряд без дугового процесу зварювання плавким електродом (суцільна лінія); б) розрахункові (1) і експериментальні (2) дані для плазмового розряду в гібридному процесі.

Далі досліджували вплив умов технології гібридного плазмово-дугового зварювання на особливості протікання фізичних та металургійних процесів, структуру, напружено-деформований стан (НДС) та властивості зварних з'єднань. Із допомогою експериментального комплексу проаналізовано особливості взаємодії плазмової дуги і дуги плавкого електроду під час спільного впливу на сталі і алюмінієві сплави, а також особливості формування і перенесення крапель розплаву плавкого електроду (рис.4).

Було встановлено, що стиснена плазмова дуга зворотної полярності зменшує в розмірі дугу плавкого електроду, заглиблює її в зварюваний метал, дозволяє отримувати глибоке проплавлення без утворення ефекту «замкової шпарини», покращує формування швів і знижує схильність до утворення внутрішніх пор та несплавлень.

За умов впливу зовнішньої плазмової дуги та використання дуги плавкого електроду постійного струму з силою струму до 180 А показано, що відбувається крупнокрапельне ($\varnothing 2,0-2,5$ мм) перенесення металу із частотами 20-50 Гц. При збільшенні сили струму дуги плавкого електроду від 180 А і більше розмір крапель зменшується, а частота їх перенесення зростає. Крім того, на відміну від традиційного MIG (MAG) процесу, при гібридному плазмово-дуговому зварюванні дуга плавкого електроду рівномірно і всебічно охоплює краплю рідкого металу, що зменшує щільність струму на поверхні краплі, знижує її перегрів і зменшує вигорання легуючих елементів електродного дроту. При цьому, на відміну від MIG процесу, розбризкування електродного металу практично відсутнє.

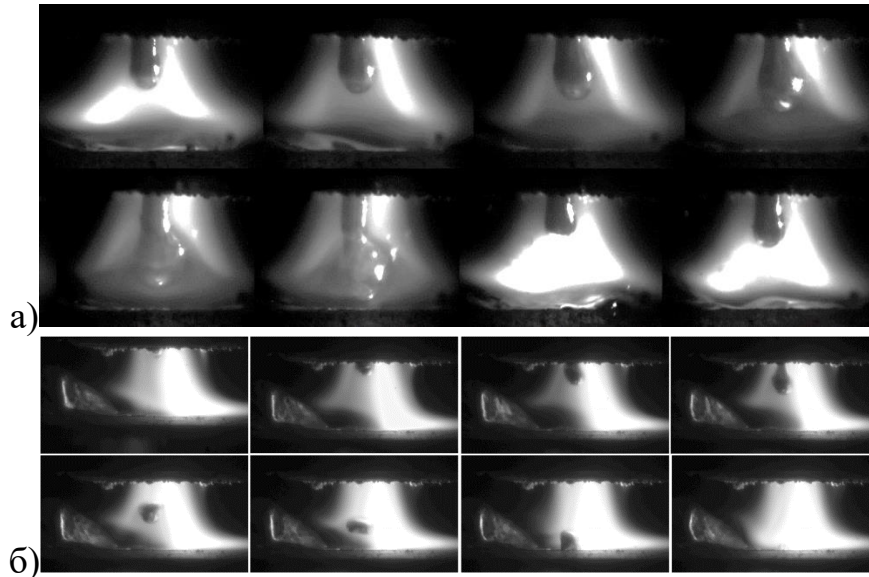


Рисунок 4. Відеофіксація етапів перенесення краплі металу під час плазмово-дугового зварювання сплаву 1561 при швидкості подачі дроту 7,4 м/хв. ($\varnothing_{др.}$ 1,6 мм, $I_{MIG}=145$ А, $I_{PL}=120$ А, час перенесення краплі – близько 50 мс) (а) та при швидкості подачі дроту 11,5 м/хв. ($\varnothing_{др.}$ 1,6 мм, $I_{MIG}=230$ А, $I_{PL}=180$ А, час перенесення краплі – близько 8 мс) (б).

Після цього вивчали взаємний вплив параметрів режиму зварювання та їх вплив на розміри та форму зварного шва. Це дозволило встановити відповідні загальні тенденції для випадків зварювання сталей і алюмінієвих сплавів та відмінності для зварювання цих металів (рис.5).

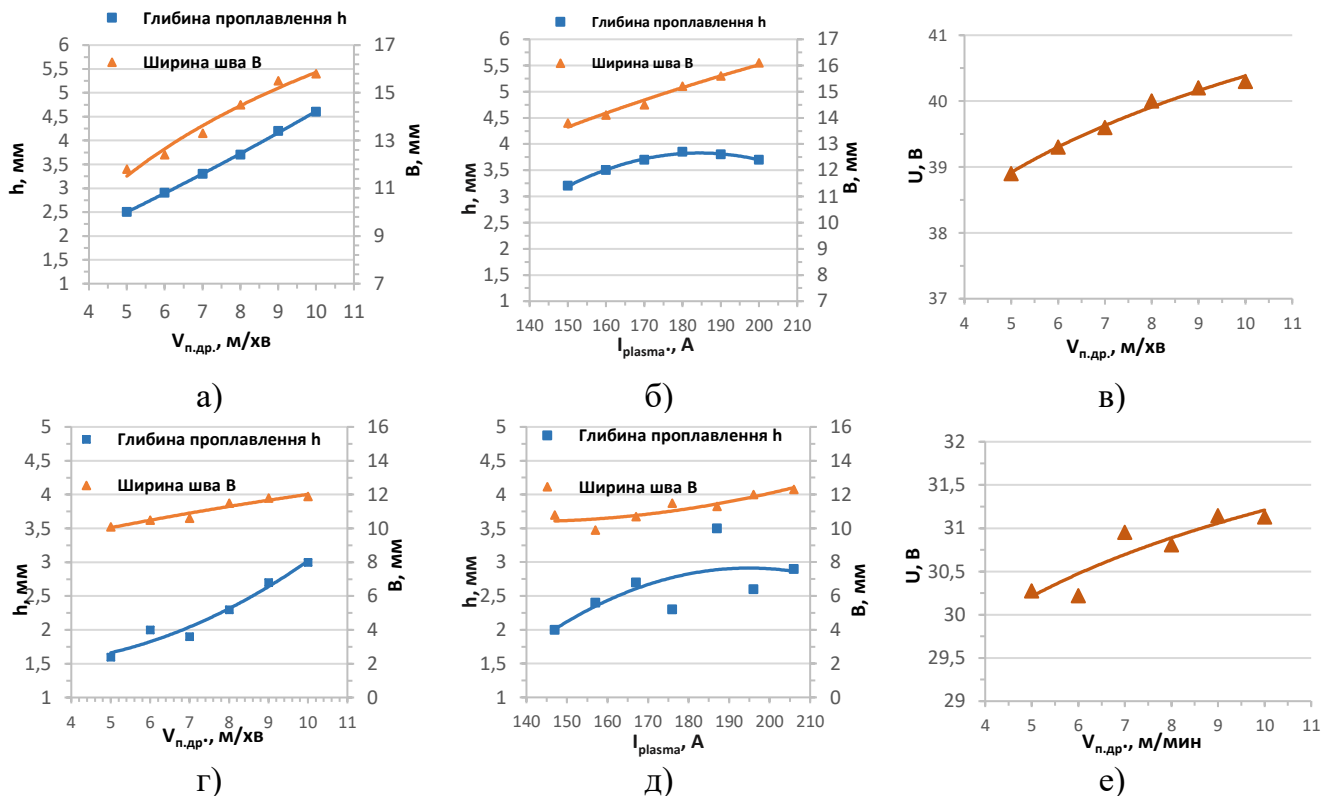


Рисунок 5. Вплив швидкості подавання дроту (а,г) і струму плазмового розряду (б,д) на глибину провару і ширину шва, а також швидкості подавання дроту на напругу плазмового розряду (в,е) при гібридному Plasma-MIG зварюванні сталі 09Г2С (а,б,в) і алюмінієвого сплаву 1561 (г,д,е).

В четвертому розділі на підставі виявлених раніше тенденцій за критерієм якості формування швів були вибрані раціональні режими гібридного Plasma-MIG

зварювання (табл.1, рис.6). Механічні випробування на статичний розрив показали, що Plasma-MIG зварювання забезпечує міцність з'єднань з алюмінієвих сплавів на рівні 80-90% від показників основного металу, на відміну від міцності 75-80% при імпульсному MIG зварюванні.

Таблиця 1. Режими гібридного Plasma-MIG зварювання сталей і сплавів.

№	Спосіб зварювання	Марка сплаву	Товщина, мм	Діаметр електродного дроту, мм	Швидкість зварювання, см/хв (м/год.)	Плазма		Плавкий електрод			Погонна енергія зварювання, Дж/мм	Питома витрата електродного дроту, г/1 м.л. шва
						Струм зварювання, А	Напруга на дугі, В	Швидкість подавання дроту, м/хв.	Струм зварювання, А	Напруга на дугі, В		
1	Plasma-MIG	09Г2С	10	1,6	38 (22,8)	190	41	8,2	380	27	2796	338
2	Plasma-MIG	AISI 304L	10	1,6	38 (22,8)	180	40	8,2	310	25	2337	338
3	Plasma-MIG	1561	8	1,6	40 (24)	175	29	6,8	140	20	1181	91,5
4	Plasma-MIG	5083	8	1,6	40 (24)	190	29,6	6,8	142	19,8	1265	91,5
5	Plasma-MIG	1561	5	1,6	60 (36)	100	24,6	7,4	165	17,9	541	66,4
6	Plasma-MIG	1561	5	1,6	100 (60)	178	29,2	7,5	154	18,2	480	40,4
7	MIG	1561	5	1,6	60 (36)	-	-	8,5	240	26,5	636	76,3
8	MIG	1561	8	1,6	30 (18)	-	-	9,5	250	27	1355	170,5

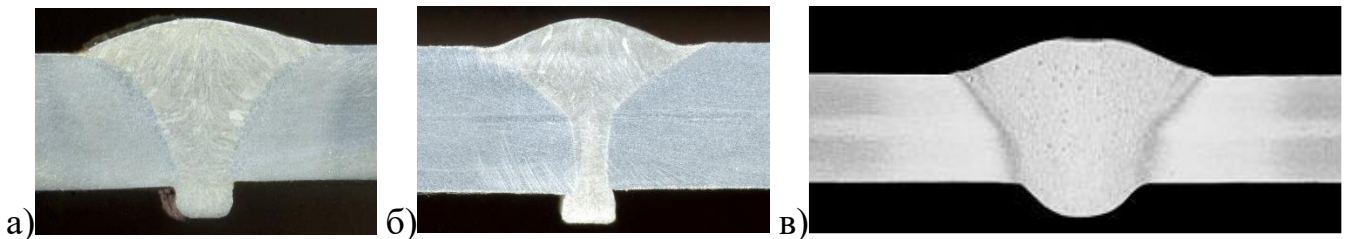


Рисунок 6. Макроструктури перетинів швів, виконаних гібридним плазмово-дуговим (Plasma-MIG) зварюванням за режимами №1 (а), №2 (б) і №6 (в) згідно табл.1.

Зниження погонної енергії на 10-20% порівняно з імпульсним MIG зварюванням (при рівних швидкостях) дозволяє на 5-10% зменшити розміщення з'єднань алюмінієвих сплавів (див. табл.2), а також зменшити втрати вмісту легкоплавких легуючих елементів в металі швів (наприклад, Mg од ~5%, Mn до 15% тощо, див. рис.7).

Таблиця 2. Показники міцності при статичному розтягненні зразків зі зварних з'єднань отриманих MIG та Plasma-MIG зварюванням листів товщиною 5 мм та 8 мм зі сплаву 1561

Спосіб зварювання	Осн. метал	Plasma-MIG	MIG	Осн. метал	Plasma-MIG	MIG
Марка сплаву	1561	1561	1561	1561	1561	1561
Товщина листа, мм	5	5	5	8	8	8
Режим зварювання згідно табл. 1	—	6	7	—	3	8
Міцність зварного з'єднання на розрив при статичному розтягненні σ_b , МПа	377	345	355	312	296	286
Міцність зварного з'єднання зі знятим підсиленням при статичному розтягненні σ_b , МПа	—	296	286	—	268	252

При цьому в порівнянні з MIG зварюванням витрати електродного дроту для випадку Plasma-MIG знижуються на 10-30%, а погонна енергія – на 20...25%.

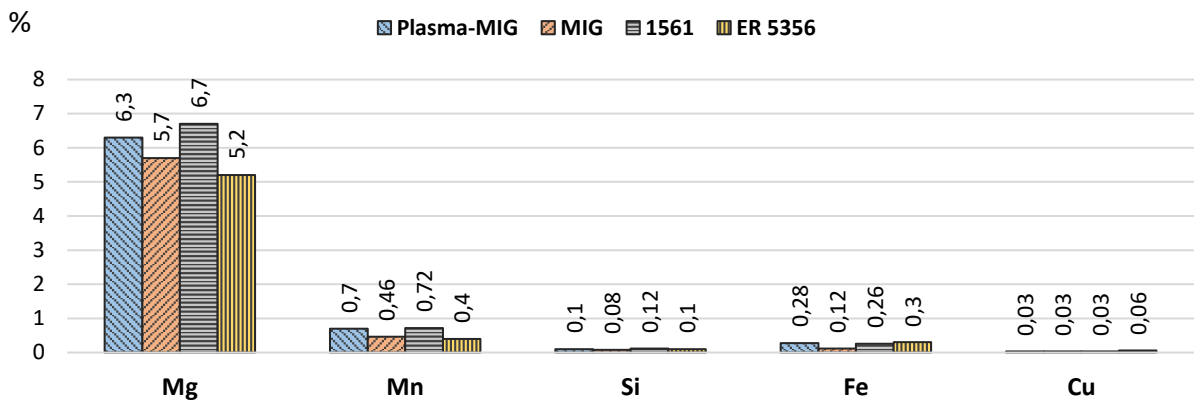


Рисунок 7. Порівняння хімічного складу металу шва деталей зварених за режимами №5, №6 і №7 згідно табл.1 з використанням дроту ER 5356, а також хімічного складу основного металу і металу електродного дроту.

Для визначення залишкового напружено-деформованого стану (НДС) після зварювання пластин алюмінієвого сплаву 1561 ($\delta=5$ мм) за допомогою програмного комплексу «Simufact welding» було проведено моделювання теплових процесів при Plasma-MIG зварюванні. Методом кінцевих елементів (МКЕ) вирішувалася зв'язана температурна пружнопластична задача про залишковий НДС при нагріві стикового симетричного з'єднання рухомим зварювальним джерелом тепла. Для моделювання зварювального джерела застосовувалася модель запропонована J. Goldak. Геометрична модель стикового зварного з'єднання (рис.8) була створена на основі розмірів, знятих з реального зварного з'єднання. Відповідно розрахованим тепловим полям визначали залишкові деформації і напруження (рис.9).

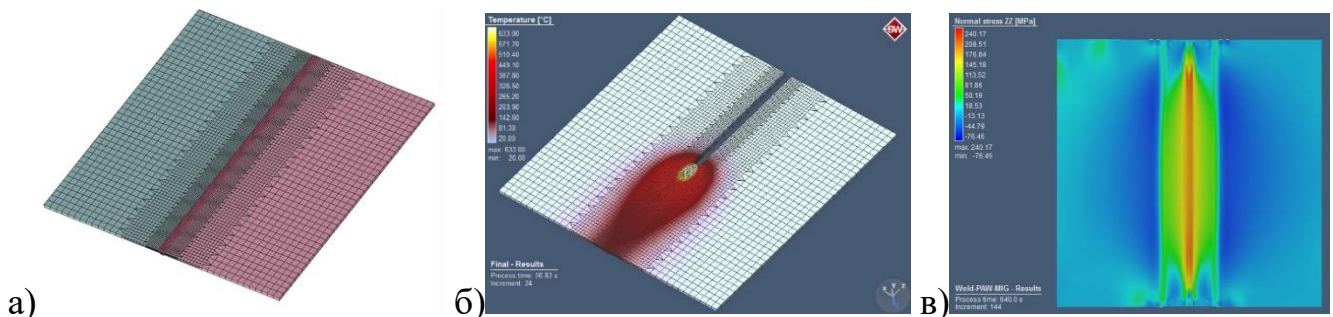


Рисунок 8. 3D кінцево-елементна модель (а), температурні поля (б) і поля залишкових нормальних напружень (в) після розкріплення зварного з'єднання з оснащення.

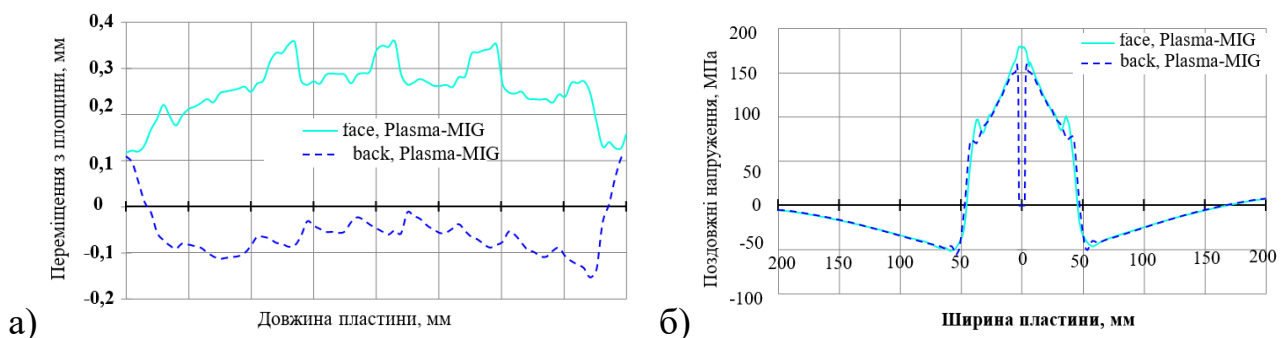


Рисунок 9. Розподіл переміщень із площини по довжині з'єднання (а) і залишкових поздовжніх нормальних напружень (б) в середньому поперечному перетині зразка.

Результати чисельного моделювання НДС (рис. 8, 9) для Plasma-MIG зварювання перевіряли шляхом їх фізичного вимірювання методом спекл-інтерферометрії на стикових зварних з'єднаннях алюмінієвого сплаву 1561 ($\delta=5$ мм). Також

досліджували результати для MIG зварювання. Було встановлено, що залишкові деформації у разі Plasma-MIG зменшуються до 20-40% порівняно з імпульсним MIG зварюванням, а залишкові напруження є на рівні таких для MIG зварювання.

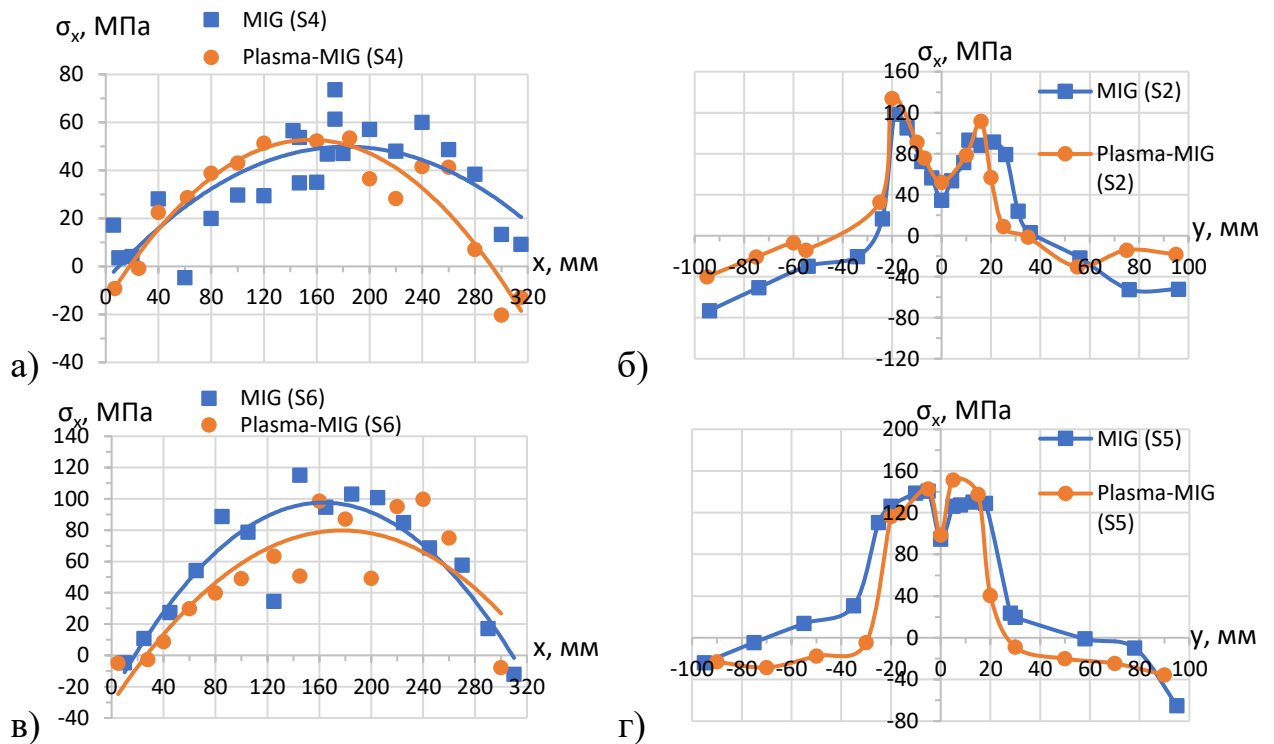


Рисунок 10. Виміряні методом спекл-інтерферометрії залишкові зварювальні напруження з лицьової (а, б) і зворотної (в, г) сторін зразків, зварених MIG і Plasma-MIG способами, в повздовжньому (а, в) і поперечному (б, г) осьових перетинах.

П'ятий розділ присвячено розробці та практичному застосуванню дослідно-промислового комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання. На базі досвіду ресурсних випробувань дослідного плазмотрону (рис.1 а, в) була розроблена модель коаксіального плазмотрону гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом для роботи в промислових умовах (рис.12, 13). З метою оптимізації конструктивних параметрів гібридного плазмотрону та підвищення ресурсу його роботи було виконано комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки по контурах плазмоутворюючого центрального та захисного газів (рис.11, а). Моделювання проводилося із застосуванням методів кінцево-елементного аналізу газодинаміки та конструктивних параметрів плазмотрону із використанням системи рівнянь Нав'є-Стокса, доповненої рівнянням для обліку турбулентності у розрахунковому програмному пакеті Solidworks Flow Simulation. Для верифікації результатів розрахунків проводились натурні випробуваннями виготовленого плазмотрону (рис.12, а, в).

На підставі результатів виконаних досліджень і випробувань нової конструкції гібридного плазмотрону (рис.12) ним укомплектовано розроблений комплекс обладнання для Plasma-MIG зварювання (рис.13). Нова модель плазмотрону має низку суттєвих покращень порівняно з дослідною, зокрема: додано ізолятор-завихрювач між електродом та плазмоутворюючим соплом, який забезпечує завихрення плазмоутворюючого газу для циклічного переміщення анодної плями плазмової дуги по робочому торцю кільцевого неплавкого електроду, збільшуючи тим самим ресурс його роботи (рис.11, б); електрод плазмової частини отримав пряме

рідинне охолодження; покращено охолодження плазмоутворюючого та захисного сопел; спроектовано нову конструкцію неплавкого електроду зі вставкою з тугоплавкого композитного матеріалу; спроектовано додаткове захисне сопло для зварювання чутливих до окислення металів (рис.12, б, в).

З допомогою розробленого і виготовленого комплексу обладнання для Plasma-MIG зварювання отримані листові зварні конструкції товщиною до 12 мм за один прохід без розробки крайок із конструкційної сталі типу 09Г2С, нержавіючої сталі AISI304 та алюмінієвого сплаву 1561.

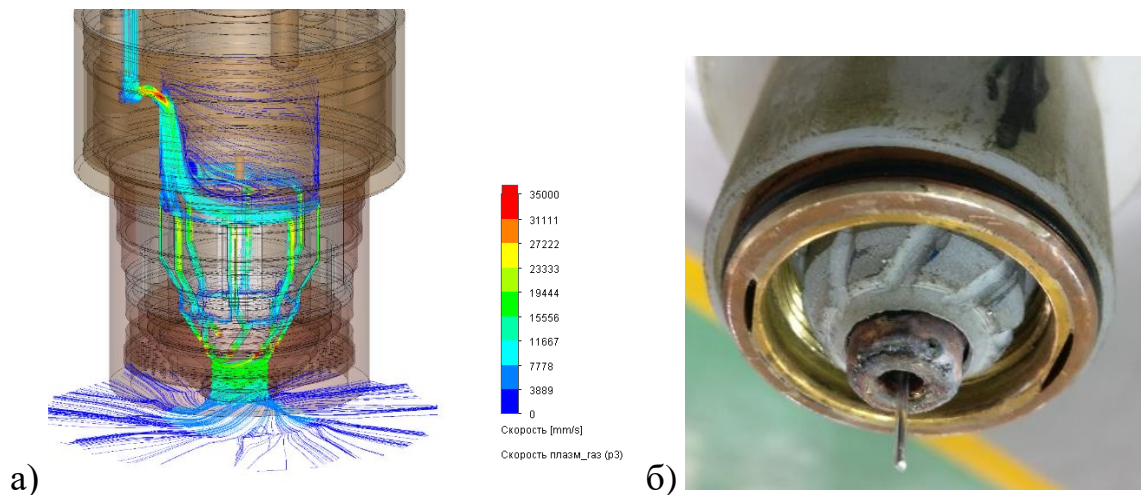


Рисунок 11. Модель гібридного плазмотрону: а) 3D-модель та моделювання протікання плазмоутворюючого газу в промисловій моделі плазмотрону для гібридного плазово-дугового зварювання; б) зовнішній вигляд ізолятора-завихрювача.

Для комплексу обладнання гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом (рис.13) розроблено систему керування, яка дозволяє задавати параметри режиму і синхронізувати роботу джерел живлення, засобів переміщення та периферійних пристроїв, забезпечуючи високу стабільність процесу.

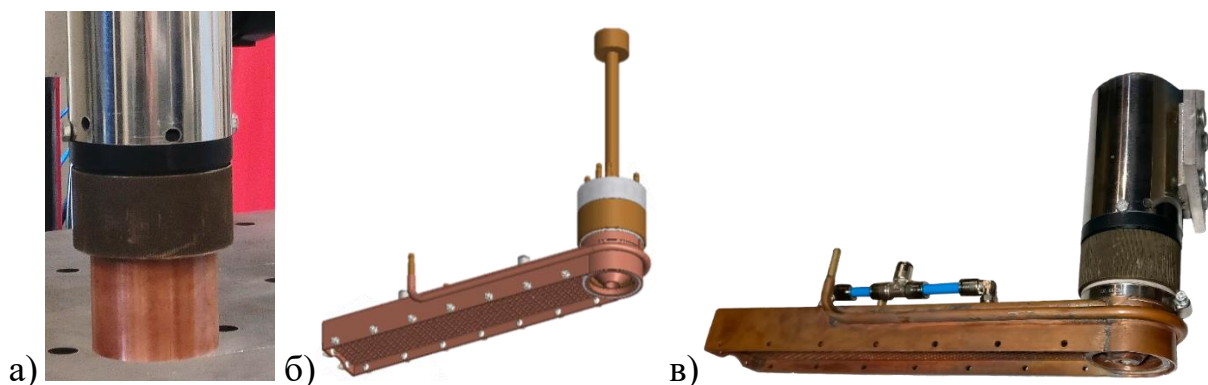


Рисунок 12. Промисловий гібридний плазмотрон: а) – зовнішній вигляд; б) – 3D-модель із додатковим захисним соплом; в) – зовнішній вигляд із додатковим захисним соплом.

Також дана система керування забезпечує інтеграцію обладнання комплексу з промисловим роботом. В розробленому комплексі, для підпалу плазової дуги використовується чергова дуга, а дуга плавкого електроду підпалюється водночас із плазовою, що підвищує стабільність старту зварювання.

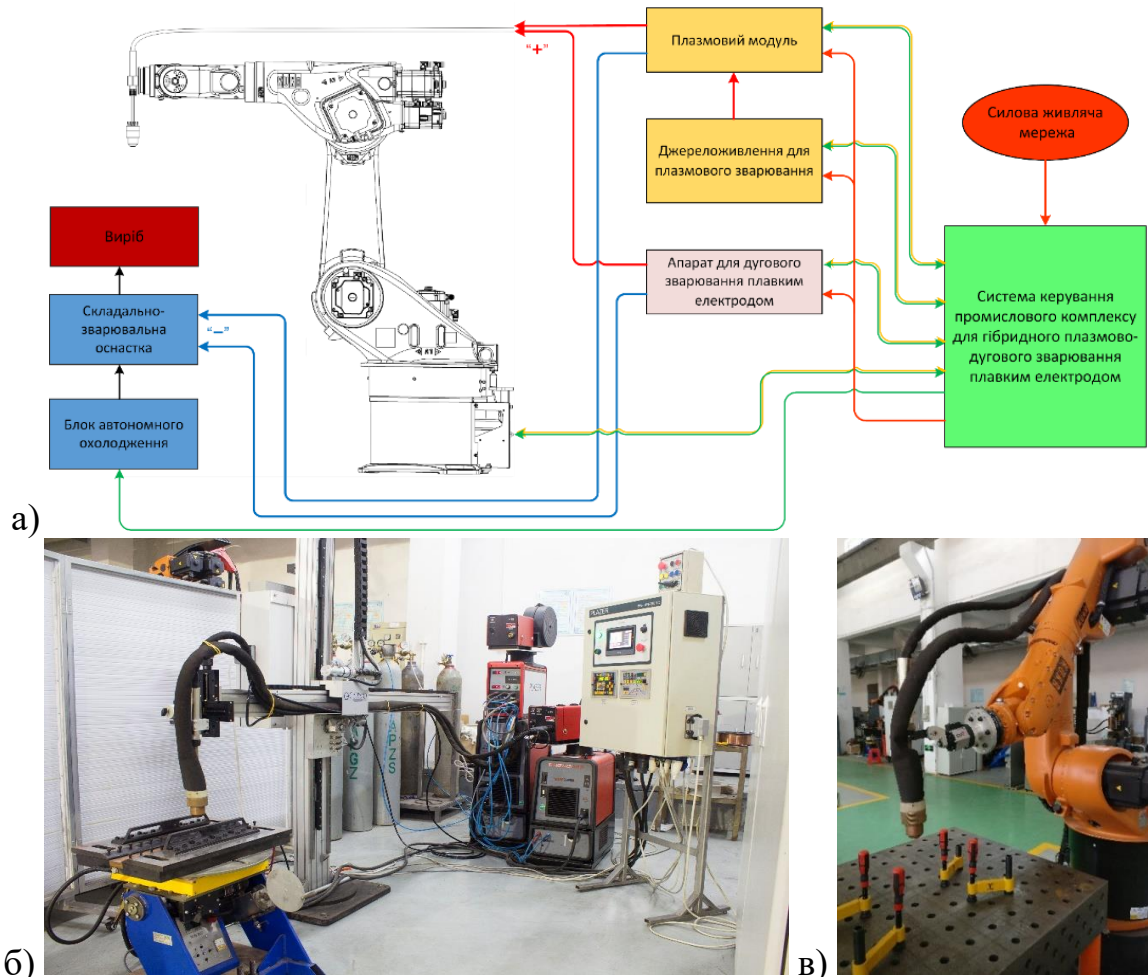


Рисунок 13. Роботизований комплекс обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом: апаратурно-технологічна схема комплексу (а), зовнішній вигляд вузлів комплексу (б), гібридний плазмотрон при роботі з роботом (в).

На базі потужностей ТОВ «НВЦ«ПЛАЗЕР» (Україна) налагоджено серійне виробництво даного комплексу. Обладнання було впроваджене в Гуандунському інституті зварювання (м. Гуанчжоу, КНР), а також в Зварювальній акціонерній компанії «HUAHENG» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, КНР). Воно використовувалося для виготовлення партій елементів судових конструкцій з алюмінієвих сплавів 1561 і 7075 товщиною 5-8 мм та сталей товщиною до 12 мм за один прохід без розробки крайок.

Таким чином, запропоновані технологічні підходи і сконструйоване обладнання є достатньо перспективними для подальшого розвитку процесів гібридного Plasma-MIG зварювання.

ВИСНОВКИ

1. На підставі дослідження фізичних та металургійних властивостей гібридного плазмово-дугового зварювання сталей і алюмінієвих сплавів показано особливості поведінки дуги з плавким електродом в умовах впливу на неї плазмової дуги, що покладено в основу підходів до мінімізації погонної енергії та покращення розподілу легуючих елементів в швах при гібридному плазмово-дуговому зварюванні.

2. З метою зменшення витрат електродного дроту та покращення механічних властивостей зварних з'єднань зі сталей та алюмінієвих сплавів створено технологічні прийоми гібридного плазмово-дугового зварювання, які порівняно з

MIG процесом дозволяють знизити погонну енергію на 40%, зменшити ефект вигорання таких легуючих елементів, як Mg (на ~5%), Mn (майже на 15%) тощо.

3. Аналіз особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом показав, що наявність плазмової дуги призводить до майже повної відсутності розбрикування електродного металу, рівномірного розподілу дуги з плавким електродом по всій поверхні краплі, що формується при масопереносі, зниження щільності струму на поверхні краплі та, як наслідок, значного зниження перегріву її поверхні та зменшення рівня вигорання легуючих елементів електродного дроту.

4. Встановлено, що вплив модифікації газодинаміки плазмоутворюючого газу створює умови циклічного переміщення анодної плями на робочому торці кільцевого неплавкого електроду, що значно підвищує ресурс його експлуатації; стиснена плазмова дуга оберненої полярності зменшує в розмірі дугу з плавким електродом та заглиблює її у зварюваний метал, що дозволяє одержувати глибоке проплавлення зразку і знижує схильність до утворення внутрішніх пор та не сплавлень.

5. Створено математичну модель, яка дозволяє спрогнозувати динаміку плавлення електродного дроту за наявності оточуючої плазмової дуги і визначити вплив дуги плавкого електроду на ВАХ плазмової дуги; на підставі даної моделі сформульовано рекомендації зі створення джерел живлення комплексу гібридного плазмово-дугового зварювання.

6. Встановлено, що при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом алюмінієвих сплавів АМг6, 1561, 5083, 7075 товщиною до 8 мм із швидкостями 15-60 м/год. погонна енергія на 25-40% менша ніж при MIG зварюванні, що дозволяє забезпечити міцність з'єднань на рівні 85-95% та їх відносне видовження до 80% від показників основного металу у сполученні із залишковими деформаціями приблизно на 20-40% меншими за такі для MIG зварювання і залишковими напруженнями на рівні таких для MIG зварювання з потенційною можливістю їх зниження.

7. Розроблено конструкцію плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з можливістю завихрювання потоків плазмоутворюючого газу та прямим рідинним охолодженням неплавкого електроду, придатного до промислового застосування. Плазмотрон у складі зварювального комплексу пройшов апробацію.

8. Створено обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом сталей і алюмінієвих сплавів з єдиною системою керування, яка дозволяє синхронізувати роботу джерел живлення, засобів переміщення та периферійного обладнання забезпечуючи можливість автоматизації і гнучкого налаштування зварювального циклу. Організовано його серійний випуск. За допомогою цього обладнання виконано зварювання партії елементів судових конструкцій зі сталей товщиною до 12 мм і алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм за один прохід без розробки крайок.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

1. Sydorets V., Korzhyk V., Khaskin V., **Babych O.**, Berdnikova O. On the Thermal and Electrical Characteristics of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 906, P. 63-71. *Автору належать постановка задачі, підготовка обладнання і проведення досліджень, порівняння одержаних практичних і розрахункових результатів.*
2. Sydorets V., Korzhyk V., Khaskin V., **Babych O.**, Bondarenko O. Electrical Characteristics of the Equipment for the Hybrid Plasma-MIG Welding. *Proceedings of IEEE 58th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (RTUCON)*. 12-13 October 2017. Riga: IEEE. P. 1-6. *Автору належать постановка задачі та аналіз виконаних розрахунків.*
3. Sydorets V., Korzhyk V., **Babych O.** On the Plasma Temperature in the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Applied Mechanics and Materials*. 2017. Vol. 872. P. 61-66. *Автору належать постановка задачі та аналіз виконаних розрахунків.*
4. **Бабич О.А.**, Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Dong C., Han S. Гібридне зварювання алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 з використанням плазмової дуги і дуги плавкого електрода (Plasma-MIG). *Автоматичне зварювання*. 2020. №7. С. 11-22. *Автору належить проведення розрахунків, аналіз результатів і висновки.*
5. **Бабич А.А.**, Коржик В.Н., Хаскін В.Ю., Донг Ч., Цай Д., Хан Ш., Лоо З. Исследование напряженно-деформированного состояния симметричных стыковых сварных соединений при автоматической гибридной сварке Plasma-MIG. *Colloquium-journal*. 2020. №17(69). С. 33-40. *Автору належить аналіз результатів і висновки.*
6. Коржик В.Н., Сидорец В.Н., Хан Ш., **Бабич А.А.**, Гринюк А.А., Хаскін В.Ю. Создание роботизированного комплекса для гибридной плазменно-дуговой сварки тонкостенных конструкций. *Автоматическая сварка*. 2017. №5-6. С. 72-82. *Автору належить конструювання частини обладнання роботизованого комплексу.*
7. Коржик В.Н., Пашин Н.А., Миходуй О.Л., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Хаскін В.Ю. Сравнительная оценка способов дуговой и гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевого сплава 1561. *Автоматическая сварка*. 2017. №4. С. 32-37. *Автору належать розробка методики проведення експериментів, виконання експериментальної частини роботи і порівняння одержаних результатів.*
8. Коржик В.Н., Квасницкий В.В., Хаскін В.Ю., Прохоренко Д.В., Перепичай А.А., Гринюк А.А., Бабич А.А. Влияние закрепления в жесткой оснастке на формирование остаточного напряженно-деформированного состояния стыковых соединений пластин из сплава 1561 при MIG, PAW и гибридной PAW-MIG сварке. *American Scientific Journal*. 2017. №17(1). С. 14-29. *Автору належать розробка методики проведення експериментів, виконання експериментальної частини роботи і аналіз результатів.*
9. Коржик В.Н., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Особенности формирования швов при гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *American Scientific Journal*. 2016. №5. С. 36-43.

Автору належать розробка методики проведення експериментів, виконання експериментальної частини роботи і аналіз частини результатів.

10. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Исследование технологических особенностей гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Sciences of Europe*. 2016. №6(6). С. 45-51. *Автору належать розробка методики проведення експериментів, виконання експериментальної частини роботи і аналіз частини результатів.*

11. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Изучение порообразования при гибридной плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов. *East European Scientific Journal*. 2016. №12(16). С. 104-110. *Автору належать розробка методики проведення експериментів, виконання експериментальної частини роботи і аналіз частини результатів.*

12. Коржик В.Н., Гринюк А.А., Хаскин В.Ю., **Бабич А.А.** Гибридная плазменно-дуговая сварка тонкостенных панелей из алюминиевого сплава. *Первый независимый научный вестник*. 2016. №12-13. С. 28-36. *Автору належать розробка методики проведення експериментів і виконання експериментальної частини роботи.*

13. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., **Бабич А.А.**, Пелешенко С.И. Гибридные технологии сварки алюминиевых сплавов на основе дуги с плавящимся электродом и сжатой дуги. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 127-135. *Автору належать підбір та аналіз частини матеріалів роботи.*

14. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., **Бабич А.А.**, Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2015. №11. С. 39-51. *Автору належать розробка методики проведення частини експериментів, виконання експериментальної частини роботи і аналіз частини результатів.*

15. Коржик В.М., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., Ткачук В.И., Пелешенко С.И., Коротенко В.В., **Бабич А.А.** Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 127-134. *Автору належать підбір та аналізі частини матеріалів роботи.*

16. Спосіб гібридного плазмо-дугового зварювання з імпульсною подачею газу: пат. 120542 Україна. № 201713005; заявл. 28.12.2017; опубл. 14.07.2019, Бюл. №24. 6 с.

17. Спосіб лазерно-плазмового зварювання: пат. 129895 Україна. №201604845; заявл. 29.04.2016; опубл. 26.11.2018, Бюл. №22. 4 с.

АНОТАЦІЯ

Бабич О.А. Гібридне плазмово-дугове зварювання з коаксіальним розміщенням дуги плавкого електроду. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені технології. – Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ, 2021 р.

В роботі розв’язана актуальна науково-технічна задача створення технологічних прийомів і обладнання гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей, алюмінієвих сплавів для підвищення механічних характеристик одержуваних з’єднань та зменшення собівартості за рахунок зниження погонної енергії і збереження вмісту легуючих елементів в швах шляхом поєднання розрахункового підходу з експериментальними дослідженнями.

На основі аналізу сучасного стану гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом показано, що наявність плазмової дуги приводить до рівномірного розподілу дуги з плавким електродом по всій поверхні краплі, яка формується при масопереносі, зменшення щільності струму на її поверхні і значному зниженню рівня перегріву поверхні краплі та, як наслідок, зменшенню вигорання легкоплавких легуючих елементів електродного дроту. Встановлено, що вплив дуги з плавким електродом на плазмову дугу зворотної полярності у поєднанні з модифікацією газодинаміки плазмоутворюючого газу створює умови циклічного переміщення анодної плями по робочому торцю кільцевого неплавкого електроду, що підвищує ресурс його експлуатації.

Встановлено, що при гібридному плазмово-дуговому зварюванні сталей типу 09Г2С, AISI304 і алюмінієвих сплавів АМг6, 1561, 5083, 7075 товщиною до 10 мм із швидкостями 15-60 м/год. погона енергія (plasma+MIG) становить $(450...750)+(250...750)$ кДж/мм, що дозволяє мінімізувати вигорання легких легуючих елементів і забезпечити міцність з’єднань з алюмінієвих сплавів на рівні 85-95% та їх відносне видовження до 80% від показників основного металу у сполученні із залишковими деформаціями приблизно на 40% меншими за такі для MIG зварювання і залишковими напруженнями на рівні таких для MIG зварювання. З метою покращення механічних властивостей та підвищення економічності одержання зварних з’єднань алюмінієвих сплавів створено технологічні прийоми гібридного плазмово-дугового зварювання, які дозволяють знизити погонну енергію на 40% порівняно із MIG процесом та мінімізувати ефект вигорання таких легуючих елементів, як Mg ($\leq 5\%$), Mn ($\leq 15\%$) тощо.

Створено математичну модель, яка дозволяє спрогнозувати динаміку плавлення електродного дроту за наявності оточуючої плазмової дуги і визначити вплив дуги плавкого електроду на вольт-амперну характеристику плазмової дуги.

Розроблено, виготовлено і впроваджено в Гуандунському інституті зварювання (м. Гуанчжоу, КНР), а також в Зварювальній акціонерній компанії «HUAHENG» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, КНР) комплекс обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, з використанням якого виготовлено партію елементів судових конструкцій з алюмінієвих сплавів 1561 і 7075 товщиною 5-8 мм та сталей товщиною до 12 мм за один прохід без розробки крайок.

SUMMARY

Babych O.A. Hybrid plasma-arc welding with the coaxial placement of the arc of the fusible electrode. - Manuscript.

Thesis for a Philosophy Doctor degree on speciality 05.03.06 – Welding and related technologies. – The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The paper addresses the current scientific and technical challenge of creating technological methods and equipment for hybrid plasma-arc welding steels and aluminum alloys to increase the mechanical characteristics of the obtained joints while simultaneously reducing costs by means of reducing heat input and maintaining the content of alloying elements in the seams by combining the calculated approach with experimental studies.

Based on the analysis of the current state of hybrid Plasma-MIG welding, it is shown that the presence of plasma arc leads to uniform distribution of the arc with a melting electrode over the entire surface of the droplet, which is formed during mass transfer, reducing current density on its surface and significantly reducing of the temperature of the droplet surface and, as a consequence, reducing the burnout of low-melting alloying elements of the electrode wire. It is established that the influence of the arc with a fusible electrode on the plasma arc of positive electrode polarity in combination with the modification of the gas dynamics of the plasma-forming gas creates conditions for cyclic movement of the anode spot along the working end of the annular nonfusible electrode, which increases its service life.

It was established, that at hybrid plasma-arc welding of steels such as Q235, AISI304 and aluminum alloys AMg6, 1561, 5083, 7075 thickness up to 10 mm with speeds of 15-60 m/h heat input (plasma+MIG) is $(450...750)+(250...750)$ kJ/mm, which allows to minimize the burning of light alloying elements and ensure the strength of the compounds of aluminum alloys at the level of 85-95% and their relative elongation to 80% of the parameters of the base metal in combination with the residual deformations are up to 20- 40% less than those for MIG welding and residual stresses at the level of such for MIG welding. In order to improve mechanical properties while increasing the cost-effectiveness of obtaining welded joints of complex alloyed aluminum alloys, technological techniques of hybrid plasma arc welding have been created, which allow to reduce the heat input up to 40% in comparison with the MIG process and minimize the burning effect of such alloying elements as Mg ($\leq 5\%$), Mn ($\leq 15\%$). A mathematical model was developed. It allows to predict the dynamics of the melting of the electrode wire in the presence of the surrounding plasma arc and to determine the influence of the MIG arc on the volt-ampere characteristics of the plasma arc.

Developed, manufactured, and implemented in the Guangdong Welding Institute (Guangzhou, China), as well as in the Welding Joint Stock Company "HUAHENG" (Kunshan, Jiangsu Province, China) a set of equipment for hybrid Plasma-MIG welding. Using this set of equipment a batch of elements of ship structures was manufactured which made of aluminum alloys 1561 and 7075 with a thickness of 5-8 mm and steels up to 12 mm thick in one pass without the development of edges.

Підписано до друку _____ 2021 р. Формат 60×84/16. Пап. офс. №1. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 1,85. Ум. фарбо-відб. 1.0. Тираж 100 прим. Зам. №
ПОД ІЕЗ ім. С.О.Патона НАН України, 03680, Київ-150, МПС, вул. Антоновича, 69