

15.04 676 2021

ВІДГУК

офіційного опонента д-ра техн. наук **В.В. Перемітька**
на дисертаційну роботу **БАБИЧА** **Олександра** **Анатолійовича**
«Гібридне плазмово-дугове зварювання
з коаксіальним розміщенням дуги плавкого електроду»,
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.03.06 — «Зварювання та споріднені процеси і технології»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Постійно зростаючі вимоги до якості та економічності одержання зварних конструкцій, збільшення об'ємів виробництва в галузях транспорту, будівництва та нафтогазової промисловості потребують розвитку нових високоефективних технологій зварювання. Такими часто стають гібридні технології, що поєднують в одному процесі декілька різних джерел тепла. Деякі з гібридних технологій, зокрема Laser-MIG, вже набули значного поширення в промисловості. Інші ж зараз лише розвиваються та досліджуються. Однією з таких є гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом (Plasma-MIG).

Процес Plasma-MIG зберігає практично усі переваги MIG зварювання та позбавлений більшості його недоліків, що робить гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом перспективною технологією для застосування у судно- та машинобудуванні, виготовленні ємностей та трубопроводів.

Виходячи з цього, дослідження особливостей процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом є актуальною науково-технічною задачею.

Актуальність теми підтверджується також виконаним комплексом науково-дослідних робіт в ІЕЗ ім. Є.О. Патона в рамках державних науково-технічних програм «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 рр.). При виконанні зазначених науково-технічних програм автор дисертації був співвиконавцем.

2. Наукова новизна одержаних результатів

У якості нових наукових результатів можна визначити наступне:

— встановлені умови циклічного переміщення анодної плями на кільцевому неплавкому електроді коаксіального плазмотрону для гібридного плазмове-дугового зварювання плавким електродом, а також шляхи управління процесами газодинаміки плазмоутворювального газу;

— експериментально визначений факт того, що за рахунок впливу плазмової дуги зворотної полярності на дугу плавкого електроду та при величині постійного струму дуги плавкого електроду до ~ 180 А спостерігається велико крапельне перенесення металу без розбризкування з частотами 20-50 Гц, а з підвищенням сили струму дуги плавкого електроду спостерігається тенденція переходу до дрібно крапельного та струминного переносу;

— встановлені умови одержання глибокого проплавлення сталей та алюмінієвих сплавів, а також зниження схильності до утворення внутрішніх пор та несплавлень металу плавкого електроду з основним металом за рахунок впливу плазмової дуги на зварюваний метал, стиснення нею дуги плавкого електроду та заглиблення останньої в зварювальну ванну;

— експериментально визначене зменшення вигорання легкоплавких елементів у разі гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвих сплавів порівняно з MIG процесом (Mg на 5%, а Mn майже на 15%) при близьких значеннях погонних енергій, а також на 15-25% зменшений розмір зони термічного впливу та на 5-15% підвищена межа міцності швів;

— встановлене зниження залишкових деформацій у зварних з'єднаннях з алюмінієвих сплавів, отриманих при гібридному зварюванні з використанням плазмової дуги та дуги з плавким електродом, порівняно із аналогічними параметрами для випадку дугового MIG зварювання.

3. Практична цінність роботи

За результатами виконаних дисертантом досліджень створено експериментальний комплекс з високошвидкісною відео реєстрацією процесів та реєстрацією електричних параметрів дуг, який дозволив встановити розмір крапель електродного дроту та частоту їх перенесення, проаналізувати поведінку дуги плавкого електроду, а також виявити вплив плазмоутворювального газу на блукання анодної плями по кільцевому аноду;

обрано параметри технологічних режимів гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом сталей типу 09Г2С, AISI304 і алюмінієвих сплавів АМг6, 1561, 5083, 7075 товщиною до 8 мм за умов досягнення швидкості до 60 м/год.;

встановлена залежність співвідношення струмів плазмової дуги і дуги неплавкого електроду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні від теплопровідності зварюваного металу;

запропоновано конструкцію і виготовлено гібридний плазмотрон для Plasma-MIG зварювання з кільцевим неплавким електродом прямого водяного охолодження зі вставкою з тугоплавкого композитного матеріалу і завихрювачем плазмоутворювального газу;

створено комплекс обладнання гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів з єдиною системою керування.

4. Обґрунтованість наукових положень у дисертації та їх достовірність

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

Основні наукові положення та результати досліджень доповідалися на національних і міжнародних науково-технічних семінарах, конференціях і зустрічах. Це свідчить про достатній ступінь апробації роботи.

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

5. Структура та зміст дисертації

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

Дисертаційну роботу виконано в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Вона складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатку. Загальний обсяг роботи – 186 сторінок, включаючи 90 рисунків, 31 таблицю та список використаних джерел зі 171 найменування на 18 сторінках, 1 додатку.

Представлено автореферат дисертації, який містить 20 сторінок, в тому числі список з 17 робіт, опублікованих автором за темою дисертації.

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

Перший розділ містить аналіз сучасного стану досліджень та тенденцій розвитку технологій та устаткування гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом. Підкреслено, що останнім часом проблема зварювання сталей і алюмінієвих сплавів вирішується за рахунок використання гібридних технологій, зокрема таких, що поєднують переваги плазмового та дугового способів зварювання. З цією метою в загальній зварювальній ванні концентрують енергію стисненої дуги з неплавким електродом та дуги з плавким електродом. Така технологія отримала назву гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом. Цей процес у світі зараз відомий як Plasma-MIG.

Автор прослідкував основні етапи розвитку гібридного плазмово-дугового зварювання та тенденції, які супроводжують його вдосконалення. Визначено основні напрямки дисертаційного дослідження, сформульовано мету роботи.

У **другому розділі** наводиться опис створеного дослідницького комплексу для вивчення гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, а також обраних методів виконання досліджень. Зокрема, міститься інформація щодо:

- дослідницького стенду, що забезпечує високошвидкісну відео реєстрацією процесів, які відбуваються в дуговому проміжку, та реєстрацією електричних параметрів двох зварювальних дуг під час проведення фізичних досліджень поведінки плазмової дуги та дуги плавкого електроду, а також їх впливу одна на одну та на формування зварного з'єднання;

- методів проведення механічних випробувань зварних зразків;

- методів виконання експериментів з дослідження напружено-деформованого стану зразків при гібридному Plasma-MIG та MIG зварюванні;

- методів проведення металургійних досліджень.

Третій розділ містить результати теоретичного прогнозування та експериментальних досліджень взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного Plasma-MIG зварювання плавким електродом. Для цього створено математичну модель взаємодії стисненої плазмової дуги та дуги з плавким електродом при гібридному плазмово-дуговому зварюванні.

Порівняння розрахункової та дослідної вольт-амперних характеристик плазмового розряду в процесі Plasma-MIG зварювання показало, що розрахункові результати корелюють з дослідними, а похибка при розрахунках не перевищує 7%.

Досліджено також вплив умов технології гібридного плазмово-дугового зварювання на особливості перебігу фізичних та металургійних процесів, форму та розміри зварних з'єднань. Проаналізовано особливості взаємодії плазмової дуги та дуги плавкого електроду під час спільного впливу на сталі та алюмінієві сплави, а також особливості формування і перенесення крапель металу плавкого електроду. Експериментально визначався взаємний вплив параметрів обох дуг та залежність від них розмірів та форми зварного шва. Це дозволило авторові встановити

відповідні загальні тенденції для випадків зварювання сталей та алюмінієвих сплавів, а також визначити відмінності при зварюванні цих металів.

У **четвертому розділі** на підставі виявлених раніше тенденцій, за критерієм якості формування швів, були обрані раціональні режими гібридного плазмово-дугового зварювання з коаксіальним розміщенням плавкого електроду. 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, що вище, ніж при імпульсному MIG зварюванні (75...80%).

Порівняно з імпульсним MIG, зниження погонної енергії на 10...20% при Plasma-MIG зварюванні дозволяє при рівних швидкостях процесів на 5...10% зменшувати знеміцнення з'єднань алюмінієвих сплавів, а також втрати вмісту певних легуючих елементів в металі швів (зокрема, Mg до ~5%, а Mn до 15% тощо). Крім того, в порівнянні з MIG зварюванням витрати електродного дроту при Plasma-MIG процесі знижуються на 10...30%.

Для визначення напружено-деформованого стану (НДС) пластин з алюмінієвого сплаву 1561 ($\delta=5$ мм) після зварювання було проведено моделювання теплових процесів при гібридному плазмово-дуговому зварюванні з коаксіальним розміщенням плавкого електроду за допомогою програмного комплексу «Simufact welding».

Результати числового моделювання НДС для Plasma-MIG зварювання перевіряли шляхом порівняння з аналогічними величинами, що вимірювалися методом спекл-інтерферометрії на стикових зварних з'єднаннях з того ж самого алюмінієвого сплаву. Було встановлено, що залишкові деформації у разі Plasma-MIG зменшуються на 20...40% порівняно з імпульсним MIG зварюванням, а залишкові напруження залишаються на рівні таких для MIG зварюванням, показуючи тенденцію до зменшення у разі збільшення розмірів зразків.

П'ятий розділ присвячено розробці та практичному застосуванню дослідно-промислового обладнання для гібридного плазмо-дугового зварювання. Описана розробка промислової моделі гібридного плазмотрону за коаксіальною схемою. З метою оптимізації конструктивних параметрів гібридного плазмотрону було виконано комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки по контурах плазмоутворювального та захисного газів.

Створено комплекс устаткування Plasma-MIG зварювання з загальною системою керування. Повідомляється про серійне виробництво даного комплексу на базі ТОВ «НВЦ«ПЛАЗЕР» (Україна). Устаткування було впроваджено у Гуандунському інституті зварювання (м. Гуанчжоу, КНР) та у Зварювальній акціонерній компанії «HUAHENG» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, КНР) при виготовленні елементів судових конструкцій з алюмінієвих сплавів 1561 та 7075 товщиною 5...8 мм та сталей товщиною до 12 мм за один прохід без розробки кромки.

Висновки дисертації достатньо повно відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації. Вони є логічними, сформульовані конкретно, відповідно до змісту дисертації.

Зміст дисертації та автореферату ідентичний. Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює результати, наведені у роботі.

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

Основні результати дисертації опубліковані в 17 наукових працях, які включають 15 статей у фахових виданнях, з яких 3 у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus; 2 патенти України на винахід. Наукові публікації охоплюють усі розділи дисертаційної роботи.

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

7. Зауваження по дисертаційній роботі

1. Пункт 1 наукової новизни не містить причинно-наслідкових зв'язків, що пов'язують одержаний результат та умови його досягнення (сформульовано як факт/висновок, без будь-якої конкретизації умов існування циклічного переміщення анодної плями та шляхів управління процесом витікання плазмоутворювального газу), що ускладнює оцінку та застосування отриманого результату.
2. Обсяг розділу 1 – літературного огляду – складає всього 16 сторінок; деякі питання, що потім виносяться на розгляд, не розглянуті взагалі, зокрема напружено-деформований стан зварних з'єднань.
3. Залишилася невідомою частка особистої участі автора у створенні дослідницького комплексу устаткування для вивчення особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання (стор.47).
4. Не зрозуміло, навіщо до роботи вносилися зовнішній вигляд стандартного устаткування та їх детальна технічна характеристика (наприклад, про апарат *Fronius TPS 450* для зварювання плавким електродом з інверторним джерелом живлення, стор.54, 55).
5. У формулі (3.4) λ , яка традиційно позначає теплопровідність, названо прихованою теплотою плавлення електродного металу.
6. До деяких наведених експериментальних даних (зокрема, на рис.3.5 та 3.6 впливу витрати захисного газу та швидкості подачі електродного дроту на напругу на плазмові дузі) бракує пояснень причин отримання саме такого характеру залежностей.

7. Наведені у розділі 4 дані щодо одержаних за допомогою Plasma-MIG способу зварних з'єднань відносяться переважно для випадку застосування алюмінієвих сплавів. Стосовно сталей інформація щодо механічних властивостей з'єднань відсутня, в роботі наявні лише параметри режимів та зображення поперечних шліфів.
8. Заявлена у висновку 10 до розділу 4 (стор.135) похибка у 15...20% між розрахованими та визначеними експериментально даними щодо напружено-деформованого стану зразків, зварених Plasma-MIG способом, в розділі власне не наводиться, співставлення конкретних цифрових значень нормальних напружень відсутнє.
9. Не зрозумілим залишилося, наскільки оригінальною є запропонована конструкція нового плазмотрона для гібридного плазмово-дугового зварювання (п.5.2.1 та стор.161): інформація про наявність охоронного документа на патент або корисну модель відсутня.
10. Враховуючи, що на початку роботи проголошується актуальність інноваційних високопродуктивних зварювальних технологій, в розділі 5 бракує наведення та порівняння значень саме показників продуктивності (α_n , q_{noz} тощо) для гібридного плазмово-дугового зварювання та близьких до нього способів за випадками використання та технічними можливостями.

11. У роботі зустрічаються окремі граматичні помилки за текстом (наприклад, стор.20, 21, 29, 51, 58, 63, 68, 70, 91, 93, 97, 100, 120, 134, 136, 139, 143) та неточності використання понять (розробки «крайок» (стор.7) замість «кромок», «верхній валик підсилення» (стор.20) замість «опуклість шва з лицьового боку», «плазмоутворюючий» газ (стор.29) замість «плазмоутворювальний», «обернена» полярність (стор.33) замість «зворотна», «порожнинний» анод (стор.34) замість «порожнистий», «щільність» струму (стор.38) замість «густина», «перетин» пластини

(стор.125) замість «переріз», «короблення» пластини (стор.126) замість «жолоблення» тощо).

Загальний висновок

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

У цілому дисертаційна робота Бабича Олександра Анатолійовича «Гібридне плазмово-дугове зварювання з коаксіальним розміщенням дуги плавкого електроду» є завершеним науковим дослідженням в області технології та устаткування для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, яке за обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем повністю відповідає вимогам до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, зокрема пунктам 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567.

Автор дисертаційної роботи — Бабич Олександр Анатолійович — заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 — «Зварювання та споріднені процеси і технології».

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



В.В. Перемітько

Підпис Перемітька Валерія Вікторовича засвідчую:

Учений секретар ДДТУ,
канд. соціолог. наук, доцент



Л.М. Сорокіна