

ГІБРИДНЕ ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ 1561 ТА 5083 З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАЗМОВОЇ ДУГИ І ДУГИ ПЛАВКОГО ЕЛЕКТРОДА (PLASMA-MIG)

О.А. Бабич¹, В.М. Коржик^{1,2}, А.А. Гринюк², В.Ю. Хаскін^{1,2}, Chunlin Dong¹, Shanguo Han¹

¹Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. С.О. Патона), Гуанчжоу, КНР
²ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

У статті показано, що для поліпшення механічних властивостей і зниження показників напружено-деформованого стану зварних з'єднань легованих алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 доцільно застосовувати гібридне зварювання плазмовою дугою із дугою плавкого електрода, яке в порівнянні з традиційним зварюванням дугою плавкого електрода дозволяє знизити витрати електродного дроту на 10...30 %, погонну енергію – до 25 %, залишкові деформації – в 2...3 рази, залишкові напруження – приблизно на 20 % за абсолютним значенням, а також на 15...20 % зменшити вигоряння такого легуючого елемента, як Mg. Бібліогр. 19, табл. 6, рис. 9.

Ключові слова: гібридне плазмово-дугове зварювання з плавким електродом (Plasma-MIG), імпульсно-дугове зварювання плавким електродом (MIG), наплавочні шви, стикові шви, міцність, вигоряння легуючих елементів, напружено-деформований стан

Інтенсивний розвиток наземного, повітряного і морського швидкісного транспорту обумовлює необхідність застосування інноваційних високопродуктивних технологій отримання зварних з'єднань складнолегованих алюмінієвих сплавів. Це пов'язано з низкою недоліків, характерних для традиційних зварювальних процесів. Так, у разі застосування зварювання з дугою плавкого електрода (MIG зварювання) відбувається значний перегрів електродного металу, що призводить до часткового вигоряння легуючих елементів алюмінієвих сплавів і, як наслідок, зниження міцності отриманих з'єднань. Крім того, при MIG зварюванні формуються досить широкі шви і мають місце значні залишкові деформації. У разі застосування зварювання з дугою неплавкого електрода (TIG зварювання) знижується продуктивність і також мають місце значні залишкові деформації. Ускладнює отримання зварних з'єднань і те, що процеси MIG і TIG зварювання вимагають попередньої розробки кромок, що зварюються.

Одним із шляхів усунення зазначених негараздів є застосування плазмового зварювання. Однак цей процес також має певні недоліки. По-перше, для плавлення присаджувального дроту необхідна додаткова енергія, вкладання якої призводить до підвищення погонної енергії зварювання. Це може призводити до формування певних залишкових напружень (деформацій). По-друге, підвищена інтенсивність енергії і осьова концентрація тиску (явище утворення кейхола) призводять до виникнення дефектів формування швів (зокрема,

підрізів, корневих дефектів, нерівномірного формування верхнього валика підсилення) і наявності внутрішньої пористості.

В останнє десятиліття традиційні проблеми зварювання та споріднених технологій вирішуються за рахунок застосування гібридних технологій [1]. Складнощі одержання з'єднань легованих високоміцних алюмінієвих сплавів також вирішують гібридним поєднанням переваг плазмового і дугового способів зварювання. Для цього в одній зварювальній ванні концентрують енергію стислої дуги з неплавким і дуги з плавким електродами. Такий підхід дозволяє звужити шов і зменшити (або повністю усунути) необхідність виконання розробки кромок, що зварюються. Також він підвищує продуктивність зварювання за рахунок стабілізації дії дуги плавкого електрода шляхом впливу на неї плазмової дуги, що охоплює першу зовні. Все це робить актуальним застосування технології гібридного плазмово-дугового зварювання з плавким електродом, більш відомого в світі під назвою Plasma-MIG.

Процес плазмово-дугового зварювання з плавким електродом був розроблений, у т. ч. для з'єднання алюмінієвих сплавів, в 1970-х роках групою дослідників з лабораторії фірми Philips [2]. Через певні складнощі створення оптимальної конструкції пальника і джерел живлення, адаптованих саме для цього процесу, гібридне Plasma-MIG зварювання досі має певні обмеження у промисловому застосуванні. Наприклад, необхідно враховувати, що при даному типі гібридного

Бабич О.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5633-5721>, Коржик В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Хаскін В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Chunlin Dong – <https://orcid.org/0000-0003-2672-5985>, Shanguo Han – <https://orcid.org/0000-0002-4299-9786>

© О.А. Бабич, В.М. Коржик, А.А. Гринюк, В.Ю. Хаскін, Chunlin Dong, Shanguo Han, 2020

процесу дуга плавкого електрода існує в оточенні іонізованої аргонової плазми, генерованої дугою неплавкого електрода, що кардинально змінює умови її горіння порівняно з GMAW/MIG процесом. В роботі [3] було показано, що електропровідність зовнішньої дуги значно вища за внутрішню через більшу щільність електронів. Відповідно, більша частина струму між плавким електродом та основним металом тече через зовнішню дугу, а на внутрішню припадає близько 5 % струму. Це, в тому числі, підтверджується більшою інтенсивністю свічення зовнішньої дуги в зоні нижче торця плавкого електрода. Вища ж інтенсивність свічення внутрішньої дуги порівняно із зовнішньою, яку відмічають більшість дослідників, обумовлена не високою щільністю струму, що протікає через неї, а більш високою інтенсивністю свічення елементів, що входять до складу газової фази в цій зоні.

В даний час продовжуються активні дослідження процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом. Такі дослідження проводяться в ряді університетів, зокрема, в Технічному університеті міста Хемніц та в SLV Muenchen (Німеччина) [4, 5]. Аналогічні дослідження проводяться в Пермському державному університеті (РФ) [6, 7]. Особливості процесу плазмово-дугового зварювання плавким електродом також вивчалися в Китаї, Японії і Бразилії [8, 9]. В Україні питаннями плазмово-дугового зварювання плавким електродом займалися в Приазовському технічному університеті та ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ [10].

Дослідження, які проводилися в останнє десятиліття, були спрямовані на ретельне вивчення окремих складових процесу і його поведінки в цілому. В роботі [11] показано, що при зварюванні алюмінієвих сплавів зі збільшенням швидкості подачі електродного дроту розмір підрізів зменшується, оскільки кількість зварювального дроту в зварювальній ванні зростає. Збільшення діаметра плазмоутворюючого сопла також сприяє усуненню підрізів через низьку електромагнітну силу перемішування, викликану низькою щільністю плазмового струму. Однак збільшення швидкості подачі дроту і, відповідно, струму дуги плавкого електрода, зсуває процес в бік традиційного MIG зварювання, що усуває переваги гібрида. Зменшення щільності плазмового струму може сприяти виникненню розбризкування металу дугою плавкого електрода. В роботах [10, 12] досить глибоко вивчені особливості поведінки обох електричних дуг, їх вплив одна на одну, на формування краплі рідкого металу і процес масопереносу.

Запропонована в роботі [12] модель нагріву електродного дроту в процесі гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом (Plasma-MIG)

дозволила провести попередню оцінку температури плазми інтегрованого газового розряду. При зварюванні алюмінієвих сплавів товщиною 5...12 мм вона може становити близько 7300...7400 К. Це свідчить про небезпеку вигорання легкоплавких легуючих елементів, які входять до складу електродного дроту і основного металу, що може призводити до ослаблення одержуваних з'єднань. Крім того, в роботі [12] спрогнозована тенденція збільшення напруги на дузі неплавкого електрода зі збільшенням швидкості протікання плазмоутворюючого газу і його температури. Таку особливість гібридного процесу необхідно враховувати при виборі режимів зварювання, зокрема, оптимізації співвідношення потужностей плазмової і дугової складових.

На відміну від опублікованих раніше робіт, в даній роботі приділяється увага впливу режимів гібридного Plasma-MIG процесу на геометрію і напружено-деформований стан одержаних з'єднань, а також порівнянню його з традиційним процесом імпульсно-дугового зварювання. При цьому отримання високоякісних з'єднань планується за рахунок супутнього підігріву зварюваного металу плазмовою дугою та зменшення напруги на дузі плавкого електрода із одночасним підвищенням його проникнення у метал. Очікується, що взаємний вплив складових гібридного процесу зварювання може сприяти досягненню зниження погонної енергії і частки вигорання легуючих елементів.

Метою дослідження є покращення механічних властивостей і зниження показників напружено-деформованого стану зварних з'єднань легуваних алюмінієвих сплавів шляхом зниження обсягу використаного електродного дроту, погонної енергії і вигорання легуючих елементів за рахунок застосування гібридного плазмово-дугового зварювання.

Досягнення цієї мети здійснювалося за наступною методикою. Спочатку на підставі літературних даних було обрано інтервали варіювання параметрів режимів гібридного плазмово-дугового (Plasma-MIG) зварювання. Далі, шляхом математичного моделювання провели аналіз впливу цих параметрів на глибину провару і швидкість зварювання, після чого обрали найбільш перспективні з позицій мінімізації тепловкладення та погонної енергії. Перевірили достовірність розрахунків і на обраних режимах виконали зварювання дослідних зразків. При цьому проаналізували взаємний вплив плазмової дуги та дуги плавкого електрода одна на одну, а також їх спільний вплив на процес гібридного зварювання. Для порівняння отриманих результатів виконали традиційне імпульсно-дугове зварювання аналогічних зразків із тією ж швидкістю або максимально близькою погонною енергією. Провели механічні випробування одержаних зразків. Дослідили вигорання одного з найбільш

Таблиця 1. Хімічний склад алюмінієвих сплавів 5083, 1561 та електродного дроту ER5356, мас. %

Марка сплава	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Домішки
5083	≤0,4	≤0,4	0,4...1,0	0,05...0,25	≤0,15	Основа	≤0,1	≤0,005	4,0...4,9	≤0,25	≤0,15
1561	≤0,4	≤0,4	0,7...1,1	-	-	"-"	≤0,1	0,0001...0,003	5,5...6,5	≤0,2	≤0,1
ER5356	0,1...0,2	0,08	0,12	0,13	0,13	"-"	0,02	-	4,95	≤0,02	-

Таблиця 2. Узагальнені теплофізичні характеристики алюмінієвих сплавів при нормальних умовах

Щільність ρ, кг/м ³	Питома теплоємність c, Дж/(кг·°C)	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/(м·°C)	Коефіцієнт температуропровідності a, м ² /с	Питома теплота плавлення L, кДж/кг	Питома теплота випаровування E, кДж/кг	Температура плавлення T _{пл} , К	Температура початку фазових переходів, К
2640	922	122	5,0122·10 ⁻⁵	390	10530	660	460

летючих легуючих елементів (магнію) в процесах зварювання. Дослідили напружено-деформований стан зварних зразків. На підставі одержаних результатів зробили відповідні висновки.

Для виконання попередніх технологічних розрахунків з міркувань найбільш широкого застосування в промислових зварних конструкціях вибрали алюмінієві сплави 5083 та 1561, при зварюванні яких використовується електродний дріт ER5356 (табл. 1). Для спрощення виконання оціночних розрахунків використовували узагальнені теплофізичні характеристики цих сплавів, наведені в табл. 2.

Для моделювання теплового джерела, що діє при Plasma-MIG зварюванні в алюмінієвій пластині, застосовувалася модель J. Goldak [13] (рис. 1). Відповідно до цієї моделі теплове джерело представляли у вигляді подвійного еліпсоїда. Розрахунок розглянутих термічних процесів зварювання проводився за допомогою кінцево-елементного моделювання. В якості основного допущення приймалося, що необмежена пластина алюмінієвого сплаву товщиною δ (наприклад, δ = 10 мм) проварюється наплавочним швом. При цьому обсяг металу, що привноситься плавким електродом, враховувався як обсяг металу пластини, що проварюють, переплавленого дугою цього електрода. Для підвищення точності розрахунків в зоні дії теплового джерела використовувалася сітка з меншим кроком, а в інших зонах – з порівняно великим.

Застосований в ході розрахунків метод кінцевих елементів заснований на припущенні, що тіло

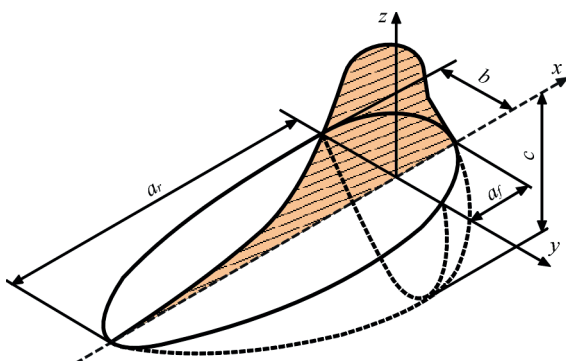


Рис. 1. Схема моделі розподіленого об'ємного джерела нагріву, що має форму двійного еліпсоїда [13]

можна уявити у вигляді набору елементів, з'єднаних один з одним тільки в вузлах. Взаємозв'язок вузлових змін температури в часі задається за допомогою температурної матриці елемента. Об'єднання температурних матриць окремих елементів в глобальну температурну матрицю тіла дозволяє записати умови теплової рівноваги тіла:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad 0 < z < \delta, \quad t > 0, \quad (1)$$

де $C(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ – ефективна теплоємність металу (з урахуванням прихованої теплоти плавлення), щільність і коефіцієнт теплопровідності, відповідно; x , y , z – Декартові координати (теплове джерело переміщується вздовж координати x зі швидкістю V); δ – товщина пластини металу, що проварюють; t – координата часу.

При заданих температурах, дія яких змінюється в часі, і при відомій глобальній температурній матриці, рішення системи рівнянь теплової рівноваги (балансу) дозволяє знайти всі вузлові значення температури в залежності від часу дії теплового джерела, а за ними – тимчасові зміни температури в межах кожного елемента. Так визначали просторово-часовий розподіл температур тіла [14].

На поверхні пластини, що нагрівається гібридним плазмово-дуговим тепловим потоком $q(t)$ протягом часу t , утворюється об'ємне теплове джерело радіусом R_{PL} , що містить в собі друге теплове джерело з дещо меншим радіусом R_{MIG} . В процесі Plasma-MIG зварювання в даній точці поверхні спочатку буде відбуватися нагрівання плазмовим джерелом, потім сумою дугового (MIG) і плазмового джерел та, на завершення, знову плазмовим джерелом. Постійна часу (час впливу теплового джерела) в кожному з цих трьох випадків буде

$$t_1 = \frac{R_{PL} - R_{MIG}}{V}; \quad t_2 = t_1 + \frac{2R_{MIG}}{V}; \quad t_3 = t_2 + t_1. \quad (2)$$

Тоді на пластину, що проварюють, буде діяти тепловий потік

$$q_{\Sigma}(t) \left\{ \begin{array}{l} q_{PL}, 0 < t < t_1 \\ q_{PL} + q_{MIG}, t_1 < t < t_2 \\ q_{PL}, t_2 < t < t_3 \end{array} \right\}; \quad (3)$$

де $q_{MIG} = A(T) \frac{P_{MIG}}{\pi R_{MIG}^2}$ – тепловий потік, що вводитья дугою плавкого електрода (MIG),
 $q_{PL} = A(T) \frac{P_{PL}}{\pi R_{PL}^2}$ – тепловий потік, що вводитья дуговою плазмою. Такі теплові потоки створює в пластині, що проварюють, об'ємне джерело нагріву, форма якого показана на рис. 1.

В ході виконання комп'ютерного моделювання відповідно до рекомендацій робіт [8–12] вибирали режими процесів Plasma-MIG зварювання, за якими способом кінцево-елементного моделювання визначали розподіл температур по глибині пластини, що проплавляють. Через постійну часу (τ , с) і розмір теплового джерела (d_{PL} , мм) визначали швидкість зварювання (V , мм/с). Це дозволило в залежності від оцінки розподілу температури по глибині пластини (в залежності від потужностей складових джерел P_{PL} і P_{MIG} , Вт) підібрати приблизні параметри режимів, на яких доцільно виконувати зварювання стикових з'єднань (табл. 3).

При виборі параметрів режимів Plasma-MIG зварювання враховували як глибину провару H , так і ширину шва, що формується, приблизно відповідну параметру d_{MIG} . Для зварювання пластин товщиною $\delta = 10$ мм між кромками, що стикуються, лишали зазор, який приблизно дорівнював діаметру електродного дроту (тобто $\sim 1,6$ мм), що дозволяло звузити шов і підвищити швидкість процесу. Зварювання пластин $\delta = 5$ мм здійснювали зі щільним стикуванням кромки. У всіх випадках зварювання велося на підкладці для уникнення витікання ванни. Такі технологічні прийоми в поєднанні з розрахунковими прогнозами дозволяють обирати швидкість зварювання 16,7 мм/с (60 м/год.). При цьому для уникнення надмірної кількості розплавленого металу в зварювальній ванні параметри варіювання потужностей повинні наближатися до співвідношення $P_{MIG}:P_{PL} \sim 4000:5000$ Вт. Наприклад, струм дуги плавкого електрода може становити $I_{MIG} = 200$ А при напрузі на дузі $U_{MIG} = 20$ В, а струм плазмової дуги – $I_{PL} = 160 \dots 180$ А при $U_{PL} = 30$ В.

Для експериментальної перевірки запропонованих режимів, а також для вивчення технологічних особливостей Plasma-MIG зварювання була розроблена лабораторна модель технологічного комплексу (рис. 2, 3). При проектуванні обладнання орієнтувалися на зварювання листів алюмінієвих сплавів товщиною від 5 до 10 мм. Згідно з проведеними розрахунками для цього сумарне

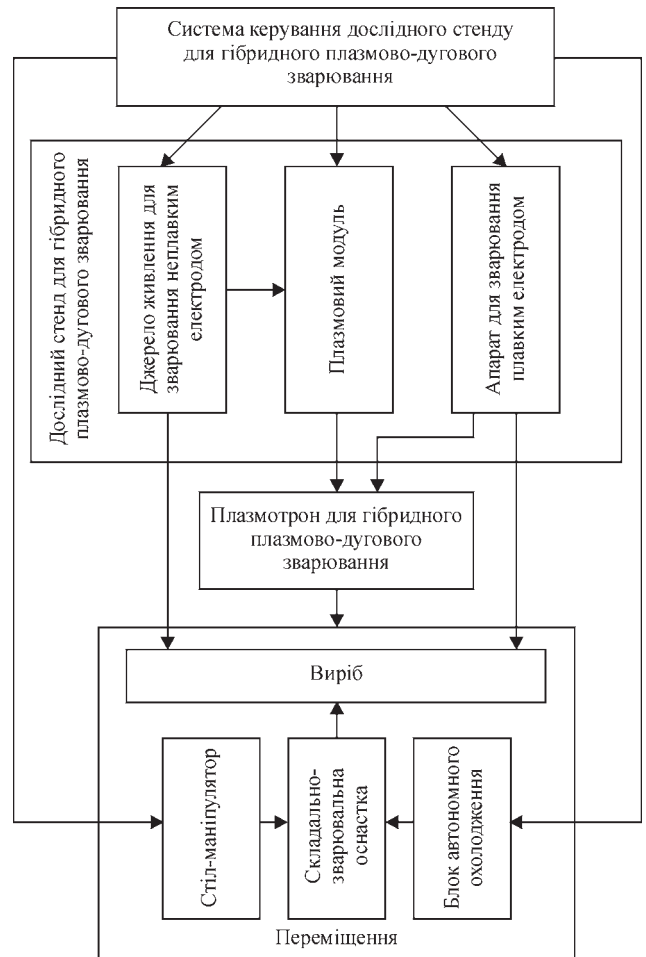


Рис. 2 Блок-схема лабораторного комплексу Plasma-MIG зварювання



Рис.3. Зовнішній вигляд лабораторного комплексу Plasma-MIG зварювання

струмове навантаження повинно складати не більше 500 А. Для отримання рівних можливостей дослідження впливу на процес як плазмової дуги, так і дуги плавкого електрода, струмове навантаження доцільно розділити приблизно порівну. Виходячи з цього міркування були обрані зварювальні джерела живлення (Tetrix 421 AC/DC фірми EWM для дуги неплавкого електрода і FRONIUS TPS 450 для дуги плавкого електрода) і спроектований інтегрований плазмотрон, здатний витримувати струми не менше 250 А як на плазмовій дузі, так і на дузі плавкого електрода з ПВ 100 %

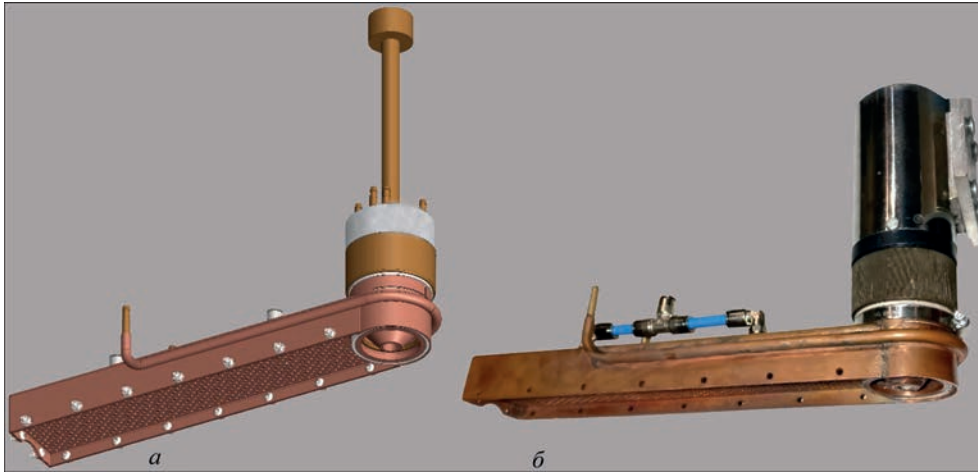


Рис. 4. 3D-модель (а) і зовнішній вигляд (б) інтегрованого плазмотрона

(рис. 4). При його виготовленні неплавкий електрод виконали діаметром 10,0 мм з осьовим отвором 5,0 мм для виключення можливості дотику електродного дроту діаметром 1,6 мм з внутрішньою стінкою електрода. Діаметр каналу плазмотворюючого сопла обрали рівним 10,0 мм з міркувань наближення до габаритів робочої площини неплавкого електрода.

В якості зразків для експериментів використовували пластини з алюмінієвих сплавів 5083 і 1561 з габаритами $(400 \dots 320) \times (200 \dots 100) \times \delta$ мм ($\delta = 5, 8$ та 10 мм). Зразки зварювали встик, також на їх поверхні виконували наплавочні шви. Для зварювання використовували електродний дріт ER5356 (діаметром 1,6 мм).

Спочатку провели серію експериментів для верифікації результатів розрахунків (рис. 5). Було встановлено, що точність розрахункового визначення загальної висоти шва лежить в межах 5...10 %, що є задовільним результатом для технологічних розрахунків. З використанням режимів, обраних розрахунковим способом, були отримані якісні з'єднання сплаву 5083 товщиною 8 та 10 мм

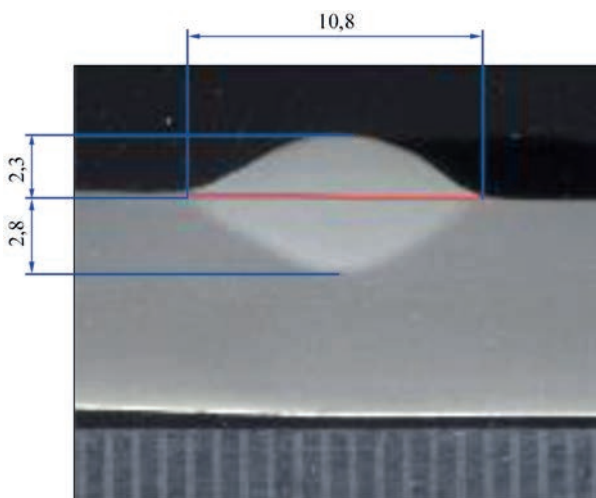


Рис. 5. Поперечний переріз наплавочного шва, виконаного на пластині сплаву 1561 ($\delta = 8$ мм) зі швидкістю 16,7 мм/с: $I_{MIG} = 200$ А, $U_{MIG} = 20$ В, $I_{PL} = 176$ А, $U_{PL} = 30$ В

(рис. 6). При цьому дуга плавкого електрода, яка стискала за рахунок зовнішньої плазмової дуги, забезпечувала проплавлення, за формою близьке до кинджального, без утворення традиційно необхідного для цього кейхола.

Після цього були проведені порівняльні експерименти зі зварювання імпульсною дугою плавкого електрода (MIG) і гібридного Plasma-MIG зварювання (рис. 7). При цьому критерієм вибору режиму служила якість формування шва при рівних швидкостях процесу. Експерименти показали зниження погонної енергії на 20...25 % і аналогічне зменшення ширини шва (в наведеному на рис. 7, а, б прикладі – з 13,8 до 10,7 мм). При цьому інтегральну погонну енергію Plasma-MIG зварювання E_{Σ} визначали як суму погонних енергій складових E_{MIG} і E_{PL} . Проводилися також експерименти з Plasma-MIG зварювання із різними швидкостями (наприклад, рис. 7, б і рис. 7, в), які показали що при збільшенні швидкості зварювання з 10 до 16,7 мм/с шви із зворотного боку звужуються приблизно вдвічі (наприклад, з 8 до 4 мм), а зверху їх ширина лишається майже незмінною. Цьому сприяє зменшення погонної енергії E_{Σ} на ~10 % (з 530 до 480 Дж/мм).

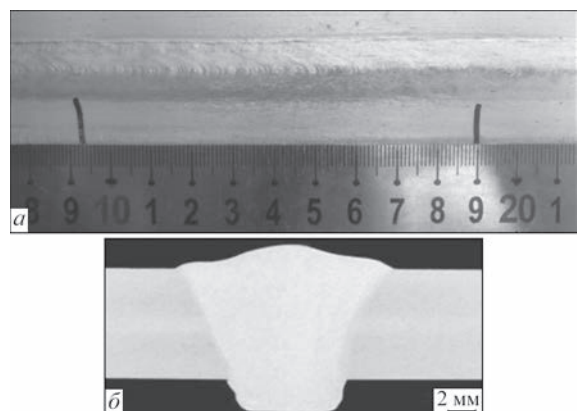


Рис. 6. Зовнішній вигляд (а) і поперечний перетин (б) стикового з'єднання сплаву 5083 ($\delta = 8$ мм), виконаного Plasma-MIG зварюванням зі швидкістю 6,67 мм/с: $I_{MIG} = 142$ А, $U_{MIG} = 20$ В, $I_{PL} = 182$ А, $U_{PL} = 30$ В, $E_{\Sigma} \approx 1230$ Дж/мм

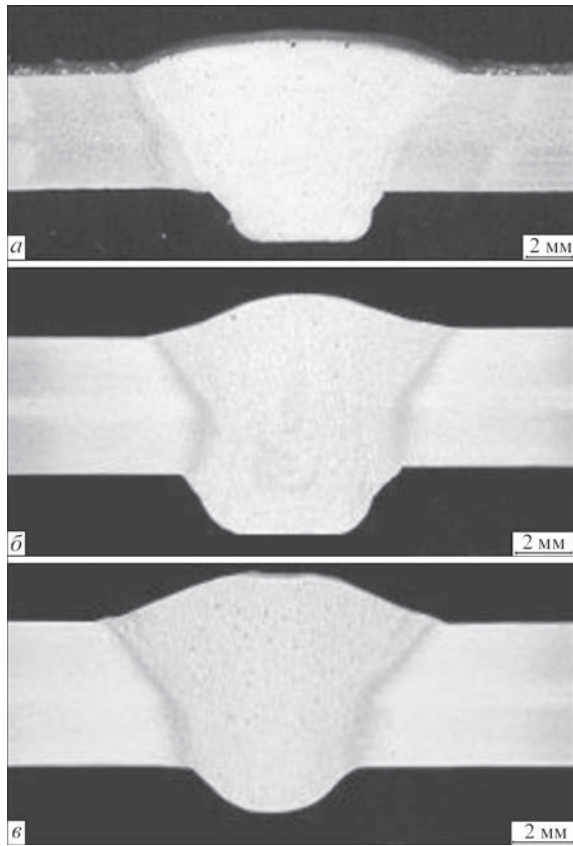


Рис. 7. Поперечні перерізи стикових з'єднань сплаву 1561 ($\delta = 5$ мм): а – MIG зварювання $V = 10$ мм/с, $I_{MIG} = 253$ А, $U_{MIG} = 26$ В, $E_{MIG} \approx 660$ Дж/мм; б – Plasma-MIG зварювання $V = 10$ мм/с, $I_{MIG} = 165$ А, $U_{MIG} = 17,4$ В, $I_{PL} = 100$ А, $U_{PL} = 24,6$ В, $E_{\Sigma} \approx 530$ Дж/мм; в – Plasma-MIG зварювання $V = 16,7$ мм/с, $I_{MIG} = 154$ А, $U_{MIG} = 18,2$ В, $I_{PL} = 178$ А, $U_{PL} = 29,2$ В, $E_{\Sigma} \approx 480$ Дж/мм

Для вивчення взаємного впливу дуг на процес Plasma-MIG зварювання застосовували зйомку перенесення краплі електродного металу за допомогою високошвидкісної відеокамери (мінімальний час експозиції 4 мкс). Це дало можливість встановити, що плазмова дуга стискає дугу плавкого електрода і перешкоджає розбризкуванню металу зі зварювальної ванни. Ступінь стиснення дуги плавкого електрода прямо пропорційна

струму плазмової дуги. При цьому плазмова дуга забезпечує супутній підігрів зварюваного металу, що підвищує глибину проникнення в нього дуги плавкого електрода, а також сприяє поліпшенню формування верхнього валика. Крім того, плазмова дуга підігріває вільний кінець електродного дроту і підвищує рівномірність нагрівання краплі, що на ньому формується, в порівнянні з нагріванням звичайною дугою плавкого електрода (рис. 8). У свою чергу дуга плавкого електрода сприяє розширенню плазмової дуги. Таке розширення прямо пропорційно величині струму дуги плавкого електрода.

Одним з важливих моментів дугового зварювання алюмінієвих сплавів є небезпека вигорання легуючих елементів дроту і основного металу [15]. Так, при імпульсному MIG зварюванні в середовищі аргону з підвищенням струму збільшується температура крапель електродного металу (до температур 2100...2600 К), що призводить до інтенсивного вигорання в них магнію (вміст магнію знижується в 2...3 рази і більше) [16]. Через вигорання магнію у краплях електродного металу можуть утворюватися пори, які в процесі масопереносу попадають до зварювальної ванни і можуть призводити до пористості швів. При Plasma-MIG зварюванні таке вигорання легуючих елементів може певною мірою бути пов'язано із взаємним впливом дуг.

Перевірку цього припущення проводили наступним чином. Для отримання досліджуваних крапель здійснювали миттєву зупинку зварювання, яка дозволяла на вільному кінці електродного дроту ER5356 діаметром 1,6 мм повністю сформуватися краплі. Для усереднення отриманих результатів набирали 6-8 таких крапель, які окремо досліджували металографічним методом (визначення пористості), а також після механічної конгломерації – методом оптичної спектроскопії (визначення вмісту магнію). Для порівняння от-

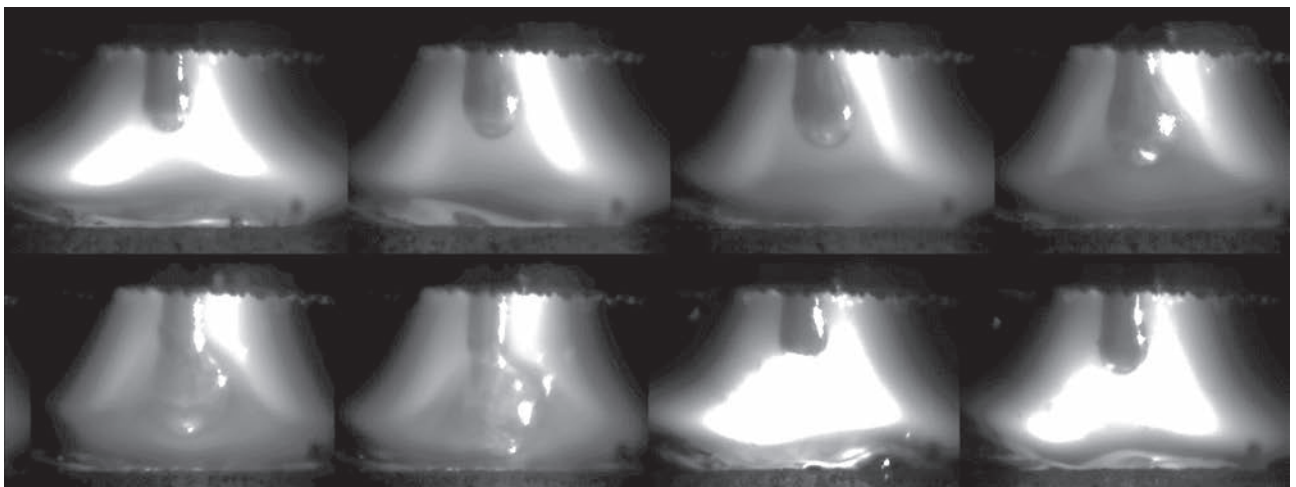


Рис. 8. Послідовне високошвидкісне відеозображення перенесення краплі металу під час Plasma-MIG зварювання при швидкості 7,4 м/хв. подачі дроту діаметром 1,6 мм ($I_{MIG} = 165$ А, $I_{PL} = 100$ А, час переносу краплі – близько 20 мс)

риманих результатів досліджували краплі електродного металу, одержуваного як при Plasma-MIG зварювання ($P_{\Sigma} \approx 6600$ Вт), так і при імпульсно-му MIG зварюванні ($P_{MIG} \approx 6580$ Вт). Було встановлено, що пористість крапель, отриманих при імпульсному MIG зварюванні вища за пористість крапель, отриманих Plasma-MIG зварюванням. За результатами спектральних досліджень визначили вміст магнію в конгломерованих краплях електродного металу (рис. 9).

В ході досліджень були виготовлені поперечні макро- і мікрошліфи зварних з'єднань, проведено їх металографічний аналіз (ISO10042:2018), виконані механічні випробування на статичний розтяг (ISO 4136:2012). Також було визначено рівень

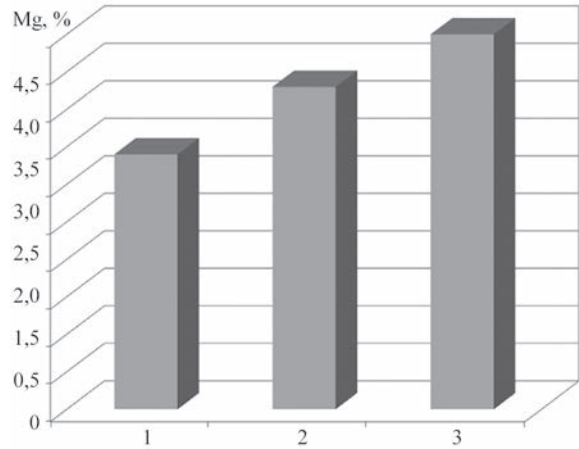


Рис. 9. Усереднений вміст магнію (мас. %) в металі: 1 – краплі, що утворилися при MIG процесі; 2 – краплі, що утворилися при Plasma-MIG процесі; 3 – електродний метал (ER5356)

Таблиця 3. Результати розрахункового визначення висоти швів H і постійної часу τ , які отримують при Plasma-MIG зварюванні алюмінієвих сплавів типу 5083 та 1561

Параметри режиму	Результати			
	Швидкість зварювання 10,0 мм/с		Швидкість зварювання 16,7 мм/с	
	Залежність $H = f(T)$	H , мм/τ, с	Залежність $H = f(T)$	H , мм/τ, с
$P_{MIG} \approx 4000$ Вт, $P_{PL} \approx 5000$ Вт, $d_{MIG} = 10,0$ мм, $d_{PL} = 11,5$ мм		$H = 9,0$ мм $\tau = 1,18$ с		$H = 5,2$ мм/τ = $= 0,694$ с
$P_{MIG} \approx 5000$ Вт, $P_{PL} \approx 5000$ Вт, $d_{MIG} = 10,0$ мм, $d_{PL} = 11,5$ мм		$H = 9,9$ мм $\tau = 1,18$ с		$H = 5,8$ мм/τ = $= 0,694$ с

Таблиця 4. Показники міцності σ_B при статичному розтягуванні з'єднань сплавів 1561 та 5083 ($\delta = 5,0$ мм), зварених зі швидкістю 10 мм/с

Зварювальний процес/сплав	σ_B , МПа			
	зразки зі знятим кореневим валиком		зразки зі знятими кореневим і верхнім валиками	
	По окремим зразкам	Усереднене значення	По окремим зразкам	Усереднене значення
Імпульсне MIG зварювання/1561	330	335	290	286
	334		283	
	340		284	
Plasma-MIG зварювання/1561	348	345	308	306
	345		307	
	342		302	
Основний метал/1561	–	–	380	377
			374	
Імпульсне MIG зварювання/5083	282	287	257	254
	292		252	
	287		254	
Plasma-MIG зварювання/5083	305	302	280	286
	303		285	
	299		292	
Основний метал/5083	–	–	315	320
			325	

залишкового напружено-деформованого стану (НДС) зварних зразків [17].

Показники міцності зразків зварних з'єднань при статичних випробуваннях на поперечне розтягування визначалися шляхом усереднення даних, отриманих на трьох зразках зі знятим кореневим валиком і на трьох зразках зі знятим кореневим валиком і верхнім підсиленням шва для випадків імпульсного MIG зварювання та Plasma-MIG зварювання. Для основного металу дані усереднювалися по двом зразкам кожного із сплавів. Як видно з табл. 4, міцність з'єднань, отриманих Plasma-MIG зварюванням, становить 80...90 % від міцності основного металу, тоді як міцність з'єднань, отриманих імпульсним MIG зварюванням, становить 75...80 % від міцності основного металу.

НДС зразків розмірами 320×205×5 мм зі сплаву 1561 з поздовжнім стиковим зварним швом, отриманим імпульсним MIG та Plasma-MIG зварюванням, вимірювали за методом, описаним в роботі [17]. Величини поздовжніх $f_1...f_3$ та поперечних $\Delta_1... \Delta_2$ прогинів (відповідно, на початку і в кінці з'єднання) вимірювали по осям зразків. Для порівнянності результатів були обрані режими з близькими значеннями погонної енергії ($E \approx 630$ Дж/мм). Режими зварювання і геометричні характеристики досліджених зразків представлені в табл. 5, а їх поперечні перерізи аналогічні показаним на рис. 7, а, б.

Вимірювання компоненти σ_x плоского напруженого стану виконували в трьох поперечних шву

перетинах $S_1...S_3$ на лицьовій стороні пластини (від лівого краю $S_1 = 166$, $S_2 = 148$, $S_3 = 156$ мм), і в одному поперечному шву перетині (від того ж краю $S_5 = 168$ мм) – на зворотній. Вимірювання поздовжньої компоненти σ_x плоского напруженого стану виконували по осі уздовж швів: з лицьової сторони у перетині S_4 , зі зворотної – у перетині S_6 шва. Дублювання вимірювань σ_x на лицьовій та зворотній стороні пластини здійснювали з метою забезпечення достовірності результатів. Значення поперечної компоненти σ_y реєстрували тільки на лицьовій стороні в перерізі S_3 .

Аналіз виконаного імпульсним MIG зварюванням зразка (табл. 5, рис. 7, а) показав наявність поздовжніх прогинів $f_1...f_3$ в діапазоні значень 1,0...1,5 мм, спрямованих в бік від лицьової поверхні. Значення поперечних прогинів $\Delta_1... \Delta_2$ стабільні по довжині зварного з'єднання і складають 1,5 мм. Особливості даних змін форми зразка визначаються формою проплавлення шва (рис. 7, а), що характеризується розбіжністю лінії прикладення усадочного укорочення і нейтральної осі перерізу. Результатом цієї невідповідності є поява згинального моменту, що викликає деформацію пластини в поздовжньому напрямку. Стабільність значень Δ по довжині пластини пов'язана з її геометричними характеристиками, що забезпечують рівномірний тепловідвід з поверхні протягом зварювального термомодеформаційного циклу.

У разі імпульсного MIG зварювання в центрі шва на лицьовій і зворотній поверхнях пластини

Таблиця 5. Режими імпульсного MIG і Plasma-MIG зварювання зі швидкістю 10 мм/с і величини прогинів зварних пластин зі сплаву 1561 ($\delta = 5,0$ мм) (електродний дріт ER5356 діаметром 1,6 мм)

Вид зварювання											
MIG					Plasma-MIG						
I_{MIG} , А	U_{MIG} , В	E_{MIG} , Дж/мм	$f_1/f_2/f_3$, мм	Δ_1/Δ_2	I_{MIG} , А	U_{MIG} , В	I_{PL} , А	U_{PL} , В	E_{Σ} , Дж/мм	$f_1/f_2/f_3$, мм	Δ_1/Δ_2
240	26,5	636	1,0/1,5/1,2	1,5/1,5	150	25,5	100	24,6	629	-0,3/-0,5/-0,4	-0,5/-0,5

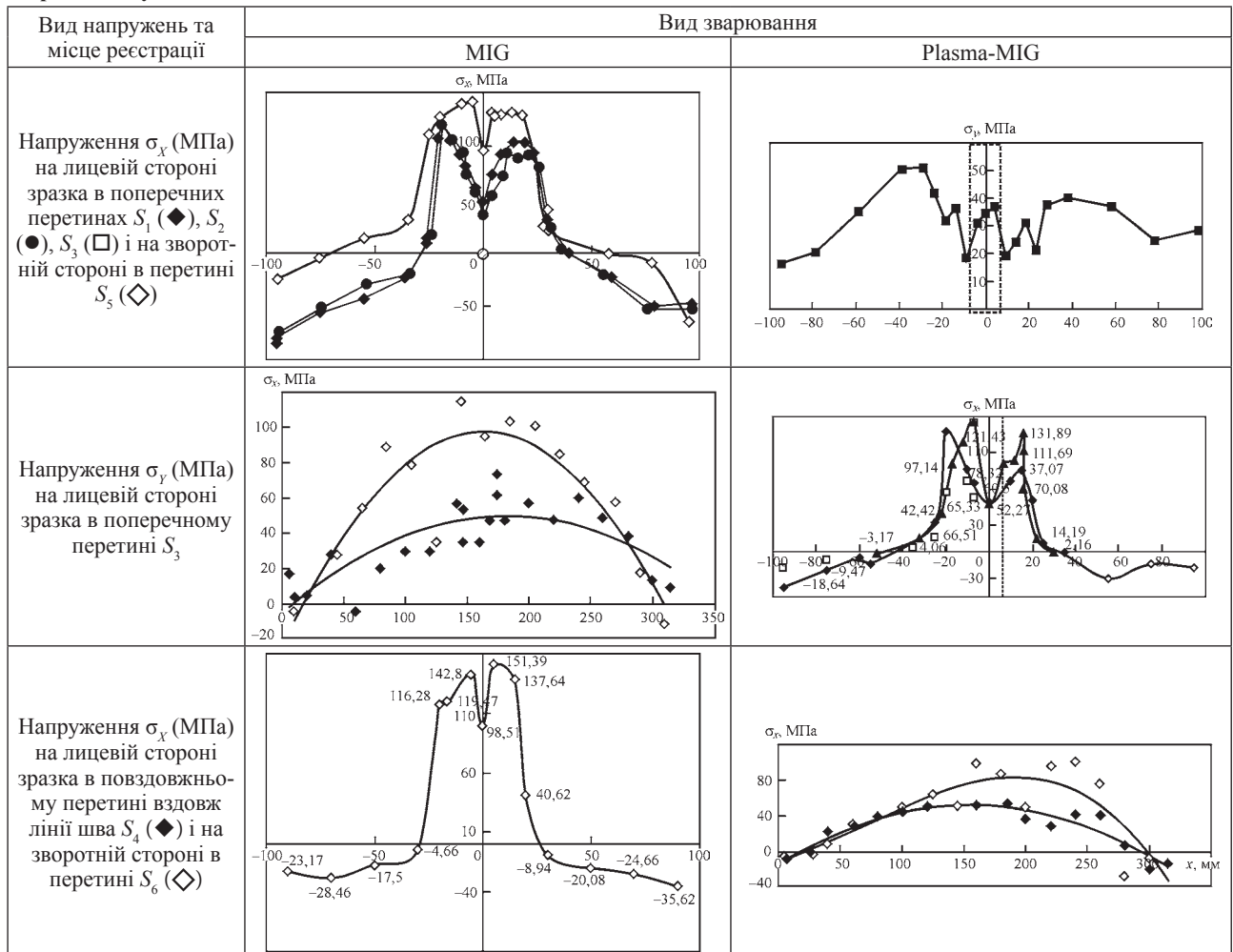
має місце локальне зниження розтягувальних напружень σ_x до величин +45...+50 та 100 МПа, відповідно (табл. 6, MIG). Пікові значення σ_x на лицьовій і зворотній поверхнях пластини мають місце в зоні сплавлення і доходять до 100 та 140 МПа, відповідно. Реактивні стискаючі напруження σ_x на лицьовій і зворотній поверхнях досягають максимальних значень на поздовжніх крайках пластини -50...-80 та -25...-60 МПа, відповідно. Така форма епюри стискаючих напружень σ_x пов'язана з малою шириною пластини, при якій напруження в поперечному перерізі не досягають нульових значень. При зіставленні епюр σ_x на обох сторонах пластини можна бачити, що має місце значна згинаюча складова напружень, що підтверджує отриману форму деформації зразка.

Оцінка поперечної складової розтягувальних напружень σ_y показала, що її рівень значно нижче, ніж рівень напружень σ_x і не перевищує 40...50 МПа, а знак напружень не змінюється уздовж вимірюваного перетину (табл. 6, MIG). При цьому має місце локальне зниження σ_y на лінії сплавлення, а пікові значення напружень відповідають зонам перетину на відстані 30...40 мм від центру шва.

Розподіл залишкових поздовжніх напружень σ_x в зварній пластині уздовж лінії шва підтверджує результати, отримані для поперечного перерізу S_1 (табл. 6, MIG). Епюри σ_x на обох сторонах пластини характеризуються різницею пікових значень, що визначає значну згинаючу складову напружено-деформованого стану пластини і підтверджує характер її формозміни.

Аналіз виконаного Plasma-MIG зварюванням зразка (табл. 5, рис. 7, б) показав наявність поздовжніх прогинів $f_1...f_3$ зі значеннями -0,3...-0,5 мм, спрямованих в бік до лицьової поверхні. Значення поперечних прогинів $\Delta_1... \Delta_2$ стабільні по довжині зварного з'єднання і також знаходяться на рівні 0,5 мм. Особливості даної формозміни визначаються формою шва (рис. 7, б), яка характеризується практичним збігом лінії прикладання усадочного вкорочення і нейтральної осі перерізу зварного шва. Порівняння форм швів на рис. 7, а та рис. 7, б показує, що площа перетину зварного шва при Plasma-MIG зварюванні на ~30 % менше, ніж при імпульсному MIG зварюванні. Виконана Plasma-MIG зварюванням пластини характеризується меншими поздовжніми усадкови-

Таблиця 6. Розподіл залишкових зварювальних напружень на лицьовій і зворотній сторонах пластин 1561 ($\delta = 5,0$ мм), зварених імпульсним MIG та Plasma-MIG способами



ми укороченнями металу шва і, відповідно, меншим значенням згинального моменту, ніж зразок після імпульсного MIG зварювання. Даний факт пояснює зменшення (до трьох разів) величини деформації в поздовжньому напрямку пластини, отриманої Plasma-MIG зварюванням. При цьому стабільність і мала величина пов'язаних з формою шва значень Δ характеризується більш рівномірним (в порівнянні з імпульсним MIG зварюванням) проплавленням по товщині пластини, а також з геометричними характеристиками зразка, які забезпечують стабільний тепловідвід з поверхні протягом зварювального термомодеформаційного циклу.

Розподіл залишкових поздовжніх напружень σ_x в поперечних перетинах зварної пластини після Plasma-MIG зварювання представлені в табл. 6 (Plasma-MIG). В центрі шва на лицьовій і зворотній поверхнях пластини має місце локальне зниження розтягувальних σ_x до 45...50 та 100 МПа, відповідно. Пікові значення σ_x на лицьовій та зворотній поверхнях мають місце в зоні сплавлення і досягають 140 та 150 МПа, відповідно. Реактивні стискаючі напруження σ_x на лицьовій і зворотній поверхнях досягають максимальних значень на поздовжніх краяхках пластини –20...–40 МПа. Дана форма епюри σ_x , як і в разі імпульсного MIG зварювання, пов'язана з малою шириною пластини, при якій стискаючі напруження в поперечному перерізі не сягають нульових значень. При зіставленні епюр σ_x на обох сторонах пластини можна бачити, що, на відміну від імпульсного MIG зварювання, згинаюча складова напружень в реактивній зоні епюри незначна, що визначає меншу величину деформації зразка.

Розподіл залишкових поздовжніх напружень σ_x в зварній пластині уздовж лінії шва підтверджує результати, отримані для поперечного перерізу S_1 (табл. 6, Plasma-MIG). Епюри σ_x на обох сторонах пластини, отриманої Plasma-MIG зварюванням, характеризуються меншою різницею пікових значень ніж при імпульсному MIG зварюванні, що визначає згинаючу складову напружено-деформованого стану пластини і підтверджує характеристики її формозміни (табл. 5).

В ході проведеної роботи було виконано ряд технологічних експериментів з Plasma-MIG зварювання, які показали, що зі збільшенням товщини зварюваних встик пластин ефективність використання цього способу підвищується. Це пов'язано з відсутністю необхідності виконання розробки кромок, що з'єднуються, при зварюванні пластин товщиною $\delta \leq 8$ мм і малим кутом (15°) розробки для $\delta = 10$ мм, а також з меншими в порівнянні з MIG зварюванням витратами електродного дроту. Якщо при зварюванні пластин товщиною $\delta = 5$ мм таке зниження витрат дроту становить 10...15 %, то при

$\delta = 8$ мм – 20...25 %, а при $\delta = 10$ мм – до 30 %, в першу чергу за рахунок усунення або мінімізації розробки кромок.

Аналіз параметрів режимів імпульсного MIG зварювання і гібридного Plasma-MIG зварювання пластин з розглянутих алюмінієвих сплавів, а також розмірів отриманих зварних швів, показав, що використання Plasma-MIG зварювання дозволяє зменшити ширину шва на 20...25 %. При цьому величина погонної енергії знижується до 25 %, що позитивно впливає на показники міцності зварного з'єднання.

Взаємний вплив плазмової дуги та дуги плавкого електрода при Plasma-MIG зварюванні в основному виражається в тому, що перша стискає другу, перешкоджаючи розбризкуванню електродного металу і здійснюючи супутній підігрів кромок, що зварюються. Це дозволяє стисненій дузі плавкого електрода проварювати значно більшу товщину металу, ніж традиційній відкритій дузі. Крім того, плазмова дуга сприяє усуненню підрізів й створенню більш плавного переходу від верхнього валика до основного металу. Передбачене в роботі [12] збільшення напруги на дузі неплавкого електрода зі збільшенням витрат плазмотворюючого газу (від 5 до 25 л/хв.) на практиці підтвердилося і склало близько 1...2 В, що не є досить суттєвим показником, але в цілому позитивно впливає на формування шва.

Дослідження крапель електродного металу, що формуються при Plasma-MIG зварюванні, показали поліпшення результатів, в порівнянні з традиційним MIG зварюванням. Можна припустити, що зниження сумарного обсягу порожнеч (пористості) в краплях, отриманих при Plasma-MIG зварюванні, викликано за рахунок зменшення діаметра стовпа дуги плавкого електрода, яке відбувається під впливом плазмової дуги, а також поліпшення умов дугового пробою в зоні переносу крапель. Останнє, на відміну від процесу імпульсного MIG зварювання, дозволяє активній плямі дуги більш рівномірно розподілятися по периметру краплі в умовах меншого тепловкладення. Всі ці фактори сприяють зменшенню кипіння рідкої краплі, виділенню водню і зменшенню випаровуванню легкозакипаючого магнію. В результаті вміст магнію збільшується на 15...25 %, зростаючи від 60...70 % при MIG процесі до 80...85 % при Plasma-MIG процесі.

При аналізі залишкового напруженого стану пластин, зварених імпульсним MIG та Plasma-MIG способами, можна помітити деяку невідповідність між рівнем розтягувальних напружень і значеннями прогинів. Так, пікові значення розтягувальних напружень σ_x для даних способів зварювання, на відміну від значень прогинів, є досить близькими, як і величини згинаючої складової напружень

в активній зоні (в центрі шва). Даний факт можна пояснити малою поздовжньою жорсткістю досліджуваних зварних пластин, а також особливостями напружено-деформованих станів, які задаються імпульсним MIG та Plasma-MIG зварюванням. Епюри σ_x в реактивній зоні напружень виходять на вільні поздовжні кромки. При цьому значення напружень на кромках пластини при Plasma-MIG зварюванні істотно нижчі, ніж при імпульсному MIG, що зменшує поздовжні прогини і, відповідно, підвищує рівень розтягувальних напружень σ_x . Таким чином, рівень напружень σ_x в зігнутій пластині після імпульсного MIG зварювання можна порівняти з рівнем σ_x в пласкій пластині після Plasma-MIG зварювання. Ці спостереження певною мірою збігаються з висновками, наведеними в роботах [18, 19]. Можна зробити висновок, що при зіставленні напружених станів пластин з рівними величинами прогинів, виконаних Plasma-MIG та імпульсним MIG зварюванням, значення σ_x в останній будуть вищими.

Висновки

1. Для поліпшення механічних властивостей і зниження показників напружено-деформованого стану зварних з'єднань легованих алюмінієвих сплавів запропоновані технологічні прийоми гібридного Plasma-MIG зварювання, які дозволяють в порівнянні з традиційним MIG процесом знизити витрати електродного дроту на 10...30 %, погонну енергію – до 25 %, залишкові деформації – в 2...3 рази, залишкові напруження на ~20 % за абсолютним значенням і зменшити на 15...20 % вигорання такого легуючого елемента, як Mg.

2. Встановлено, що стисла плазмова дуга зворотної полярності, яка має переважаючу на 20...30 % потужність, зменшує в розмірі дугу плавкого електрода, заглиблює її в зварюваний метал, дозволяє отримувати кинджальне проплавлення зразка без утворення кейхола, покращує формування швів і знижує схильність до утворення внутрішніх пор і несплавлень.

3. Встановлено, що при гібридному Plasma-MIG зварюванні алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 товщиною до 10 мм зі швидкостями 30...60 м/год. інтегральна погонна енергія становить $E_{\Sigma} = 500...1000$ Дж/мм, що позитивно впливає на склад і структуру шва, забезпечуючи міцність з'єднань на рівні 80...90 % від показників основного металу, на відміну від міцності 75...80 % при імпульсному MIG зварюванні.

Робота виконувалася в рамках проєктів:

– № 2019A050508006 «Investigation of the stress-strain state of symmetric butt welds in automatic hybrid welding «Plasma-MIG» (Дослідження напружено-деформованого стану симетричних стикових зварних з'єднань при автоматичному гібридному зварюванні «Плазма-MIG»);

– № 2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (Науково-дослідні розробки лазерних і плазмових технологій гібридного зварювання і різання)», Guangzhou, China;

– № 2017GDASCX-0411 «Capacity-Building of Innovation-Driven Development for Special Fund Projects (Дослідження фізико-хімічних процесів при взаємодії парової плазми з поверхнею металів і розробка наукових основ технології водно-повітряного плазмового різання листових сталей для отримання зварних з'єднань)», Академія наук провінції Гуандун (КНР);

– № 2018A050506058 Research and application of hybrid laser and arc welding technology with high power on highstrength steel for shipbuilding (Дослідження і застосування гібридного лазерного і дугового зварювання з високою потужністю на високоміцній сталі для суднобудування)», Guangzhou, China.

Список літератури/References

1. Korzhyk, V., Khaskin, V., Perepychay, A. et al. (2020) Forecasting the results of hybrid laser-plasma cutting of carbon steel. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 1/2, 104, 6–15.
2. Adrianus Christinus Henricus Jozef Lieikens, Wilhelmus Gerardus Essers (1971) *Method of and device for plasma arc welding*. U.S. Philips Corporation. Pat. 3,612,807 US, B23k9/00.
3. Ton, H. (1975) Physical properties of the plasma-MIG welding arc. *J. of Physics D: Applied Physics*, 8, 922–933.
4. Matthes, K.-J., Kusch, M. (2000) Plasma-MIG-Scheißen. *Praktiker*, 5, 182–188.
5. (2007) Hybrid Welding: An alternative to SAW. *Welding J.*, 10, 42–45.
6. Цицын Ю.Д., Тыткин Ю.М. (1986) Плазменная сварка плавящимся электродом алюминиевых сплавов. *Сварочное производство*, 5, 1–2.
Shchitsyn, Yu.D., Tytkin, Yu.M. (1986) Consumable electrode plasma welding of aluminium alloys. *Svarochn. Proizvodstvo*, 5, 1–2 [in Russian].
7. Цицын Ю.Д., Цицын В.Ю., Херольд Х. и др. (2003) Плазменная сварка алюминиевых сплавов. *там же*, 5, 36–42.
Shchitsyn, Yu.D., Shchitsyn, V.Yu., Herold, H. et al. (2003) Plasma welding of aluminium alloys. *Ibid.*, 5, 36–42 [in Russian].
8. Bai, Yan, Gao, Hong-Ming, Qiu, Ling (2010) Droplet transition for plasma-MIG welding on aluminium alloys. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 20, 2234–2239.
9. Tiago Vieira da Cunha, Jair Carlos Dutra (2007) Processo Plasma-MIG – Contribuição do Arco Plasma na Capacidade de Fusão do Arame. *Soldagem Insp. São Paulo*, 12, 2, 89–96.
10. Grinyuk, A.A., Korzhik, V.N., Shevchenko, V.E. et al. (2016) Hybrid technologies of welding aluminium alloys based on consumable electrode arc and constricted arc. *The Paton Welding J.*, 5-6, 98–103.
11. Hee-Keun, Lee, Kwang-San, Chun, Sang-Hyeon, Park, Chung-Yun, Kang (2015) Control of surface defects on plasma-MIG hybrid welds in cryogenic aluminum alloys. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 7, 770–783.
12. Sydorets, V., Korzhyk, V., Khaskin, V. et al. (2017) On the Thermal and Electrical Characteristics of the Hybrid Plas-

- ma-MIG Welding Process. *Materials Science Forum*, ISSN: 1662-9752, 906, 63–71.
13. Goldak, J.A., Akhlaghi, M. (2005) *Computational welding mechanics*. O., USA.
 14. Bofang, Zhu. (2018) *The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering* – John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
 15. Khaskin, V.Yu., Korzhyk, V.M., Peleshenko, S.Y., Wu, Boyi (2015) Evaporation of alloying elements in the material to be welded using laser radiation. *First Independent Scientific J.*, 3, 108–114.
 16. Wang, J., Nishimura, H., Katayama, S., Mizutani, M. (2011) Evaporation phenomena of magnesium from droplet at welding wire tip in pulsed MIG arc welding of aluminium alloys. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 16, 418–425.
 17. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 24–29.
 18. Korzhik, V.N., Pashchin, N.A., Mikhoduj, O.L. et al. (2017) Comparative evaluation of methods of arc and hybrid plasma-arc welding of aluminum alloy 1561 using consumable electrode. *Ibid*, 4, 32–37.
 19. Korzhyk, V.N., Kvasnytskyi, V.V., Khaskin, V.Yu. (2017) Influence of rigid restraint on formation of residual stress-strain state of plate butt joints from 1561 alloy in MIG, PAW and hybrid PAW-MIG welding. *American Scientific J.*, 17, 1, 14–29.

HYBRID WELDING OF ALUMINUM 1561 AND 5083 ALLOYS USING PLASMA ARC AND CONSUMABLE ELECTRODE ARC (PLASMA-MIG)

O.A. Babych¹, V.M. Korzhyk^{1,2}, A.A. Grynyuk², V.Yu. Khaskin^{1,2}, Chunlin Dong¹, Shanguo Han¹

¹Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding) Guangzhou, China.

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

In the article it is shown that to improve mechanical properties and decrease indices of stress-strain state of welded joints of alloyed aluminum 1561 and 5083 alloys it is rational to apply hybrid plasma arc welding using arc of a consumable electrode, which as compared to traditional welding using arc of a consumable electrode allows reducing the electrode wire consumption by 10...30 %, input energy – up to 25 %, residual deformations – by 2...3 times, residual stresses – by about 20 % according to absolute value, as well as reducing burnout of such alloying element as Mg by 15...20%. 19 Ref., 6 Tabl., 9 Fig.

Keywords: hybrid plasma arc welding using consumable electrode (Plasma-MIG), pulsed arc welding using consumable electrode (MIG), surfacing welds, butt welds, strength, burnout of alloying elements, stress-strain state

Надійшла до редакції 11.06.2020

ВЕДУЩАЯ ВЫСТАВКА В МИРЕ
СВАРКА • РЕЗКА • ОБРАБОТКА

LET'S JOIN
THE WORLD!

13.-17. сентября 2021

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ
СЕЙЧАС!

SCHWEISSEN
& SCHNEIDEN
No. 1
IN THE WORLD

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE
ESSEN