

ВПЛИВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ЛАЗЕРА НА ПРОЦЕС ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 1561

Y. Zhao, X. Wang, Z. Liu, V. Khaskin

Ключова лабораторія передових технологій зварювання провінції Гуандун, Китайсько-український інститут зварювання,
Академія наук Гуандуну, Гуанчжоу, 510650, Китай. E-mail: 13826482032@163.com

Проаналізовано результати зварювання алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 6 мм імпульсною дугою з плавким електродом (P-MIG) із додаванням сфокусованого випромінювання Nd:YAG-лазера і без нього. При лазер-P-MIG зварюванні вплив дугового джерела енергії сприяє покращенню поглинання лазерного випромінювання і якісному формуванню підсилення шва, а вплив лазерного джерела призводить до збільшення глибини проплавлення за рахунок утворення пароголового каналу (keyhole) і до зменшення густини струму анодної області дуги на електродному дроті, що зменшує викиди зварювальних аерозолів. Визначено фактори впливу на ефективність дії лазерного випромінювання при лазер-P-MIG зварюванні. Показано, що підвищення потужності лазерного випромінювання призводить до зростання напруги на дузі із одночасним зменшенням зварювального струму. Формування якісних швів P-MIG зварюванням сплаву 1561 потребує погонної енергії 4,5...5,0 кДж/см, при цьому утворюється регулярна структура металу швів із дендритним параметром 13...15 мкм і міцністю з'єднань 90...92 % міцності основного металу. Введення в процес зварювання сфокусованого випромінювання Nd:YAG-лазера потужністю 3,0 кВт дозволяє приблизно вдвічі зменшити погонну енергію, за рахунок чого дендритний параметр зменшується до 10 мкм, а міцність з'єднань збільшується до 93...96 % міцності основного металу. Бібліогр. 17, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, імпульсне зварювання дугою з плавким електродом (P-MIG), випромінювання Nd:YAG-лазера, режими, зварювальні аерозолі, структури, міцність

Вступ. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Питання зварювання конструкцій з алюмінієвих сплавів стає все більш актуальним у зв'язку із збільшенням попиту на полегшені транспортні та технічні засоби, прилади тощо [1]. Цьому ж сприяє застосування широкої номенклатури будівельних конструкцій з алюмінієвих сплавів [2]. Зокрема, інтерес дослідників викликає застосування в якості будівельних та конструкційних матеріалів алюмінієвих сплавів четвертої, п'ятої і шостої серій [3]. Ці сплави приваблюють не лише такими характеристиками, як зносо- і корозійна стійкість, сполучення низької густини із прийнятною міцністю, а й достатньо доброю зварюваністю [4]. Технології зварювання конструкцій з таких матеріалів відпрацьовуються вже досить давно [5]. Але з виникненням сучасних способів зварювання, зокрема лазерно-дугових і лазерно-плазмових [6], постає питання щодо підвищення ефективності процесів з'єднання вже добре відомих матеріалів.

Застосування лазер-MIG процесу може бути більш вигідним для зварювання алюмінієвих сплавів, ніж використання процесів лазер-TIG або лазер-плазма, через більшу технологічність введення додаткового матеріалу при формуванні шву і простішу спроможність керувати його структуроутворенням. Однак, процес лазер-MIG

зварювання має свої особливості. Так, при даному способі зварювання сплаву 5083 товщиною 5 мм із застосуванням випромінювання волоконного лазера було виявлено схильність до утворення крупної пористості у швах [7]. Це було пов'язано із порушенням стабільності пароголового каналу (keyhole). Усунути цей недолік може допомогти перехід до теплопровіднісного режиму зварювання, який виключає утворення пароголового каналу (keyhole) [8]. Але це знижує ефективність застосування лазерного випромінювання. Ще одним варіантом покращення якості лазер-MIG зварювання сплаву 5083 може бути процес двостороннього зварювання, який більш підходить для з'єднання товщин понад 10 мм [9].

Таким чином, постає актуальна задача дослідження особливостей процесу зварювання відомих конструкційних алюмінієвих сплавів, зокрема п'ятої серії, із застосуванням дуги з плавким електродом і лазерного випромінювання. При цьому важливо розглянути фактори підвищення ефективності застосування випромінювання із довжиною хвилі порядку 1,06 мкм. В якості досліджуваного сплаву можна розглянути сплав 5083 або близький до нього 1561 товщиною до 10 мм [10].

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – проаналізувати можливості підвищення ефек-

Y. Zhao – <https://orcid.org/0000-0001-9471-4490>, X. Wang – <https://orcid.org/0009-0003-3423-2547>,

Z. Liu – <https://orcid.org/0000-0002-0074-9666>, V. Khaskin – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>

© Y. Zhao, X. Wang, Z. Liu, V. Khaskin, 2024

тивності процесу і зменшення питомого енерговкладання в метал при зварюванні алюмінієвого сплаву 1561 імпульсною дугою з плавким електродом (P-MIG) за рахунок залучення до процесу лазерного випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону спектру.

Для досягнення цієї мети пропонується розв’язання наступних завдань:

- 1. Проаналізувати взаємодію дугового і лазерного джерел енергії в процесі зварювання сплаву 1561 та вплив лазерного випромінювання на особливості P-MIG зварювання.
- 2. Проаналізувати вплив зміни потужності лазерного випромінювання на формування швів, зміну площі поперечного перерізу швів та інші параметри процесу P-MIG зварювання сплаву 1561.
- 3. Порівняти отримані результати P-MIG зварювання сплаву 1561 без застосування лазерного випромінювання і з його застосуванням.

Матеріали, обладнання та методи дослідження. Для вирішення поставленої мети роботи обрали наступну методику виконання досліджень: вибір параметрів режиму P-MIG зварювання алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 6 мм за критерієм задовільного формування зварного шву, дослідження впливу додавання сфокусованого лазерного випромінювання (довжина хвилі $\lambda = 1,06$ мкм) на процес P-MIG зварювання, порівняння проплавлення пластин сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) P-MIG зварюванням без і з додаванням лазерного випромінювання, вибір параметрів режиму лазер-P-MIG зварювання сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) за критерієм задовільного формування зварного шва, аналіз отриманих результатів за макрошліфами поперечних перетинів швів, визначення перспективності застосування сфокусованого лазерного випромінювання ($\lambda = 1,06$ мкм) спільно із імпульсною ду-

гою з плавким електродом при зварюванні сплавів системи Al-Mg.

Для проведення експериментів в роботі використовували зразки алюмінієвого сплаву 1561 розміром $300 \times 100 \times 6$ мм. Хімічний склад сплаву 1561 наведено у табл.1. В якості плавкого електроду використовували дріт діаметром 1,2 мм з того ж сплаву.

Експерименти проводилися за схемою, запропонованою в роботі [11]. Згідно даній схемі було зібрано лабораторний стенд на базі трикоординатного маніпулятора, за допомогою якого проводили P-MIG і лазер-P-MIG зварювання (рис. 1). Для цього застосували оригінальну зварювальну головку, що інтегрувала лазерну і дугову складові. При проведенні досліджень з P-MIG зварювання дуговий пальник встановлювали сторч зразка, а у дослідженнях із лазер-P-MIG зварювання сторч зразка було розташовано вісь сфокусованого лазерного променя, а дуговий пальник знаходився спереду по ходу зварювання під певним кутом (рис. 1, а). В якості захисного газу використовували аргон із витратами 12...20 л/хв. Випромінювання потужністю до 4,0 кВт підводили від Nd:YAG-лазера за допомогою оптичного волокна діаметром 400 мкм (діаметр плями фокусування до 0,5 мм). У якості джерела живлення P-MIG процесу використовували «Fronius TPS-2700» зі струмом зворотної полярності частотою порядку 300 Гц.

Зварювання зразків виконували без розробки крайок. Кут нахилу осі сфокусованого лазерного випромінювання до зварюваного металу складав 81° , а кут нахилу дугового пальника – 55° . Корінь шва формували на змінній підкладці з нержавіючої сталі із формуючою канавкою глибиною 1,5...2,1 мм.

Після зварювання виконували поперечні перетини зразків, з яких далі виготовляли макрош-

Таблиця 1. Хімічний склад сплаву 1561, мас. %

Al	Mn	Si	Fe	Cu	Zn	Zr	Mg	Be
Основа	0,8...1,1	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	0,02...0,12	5,5...6,5	0,0001...0,0003

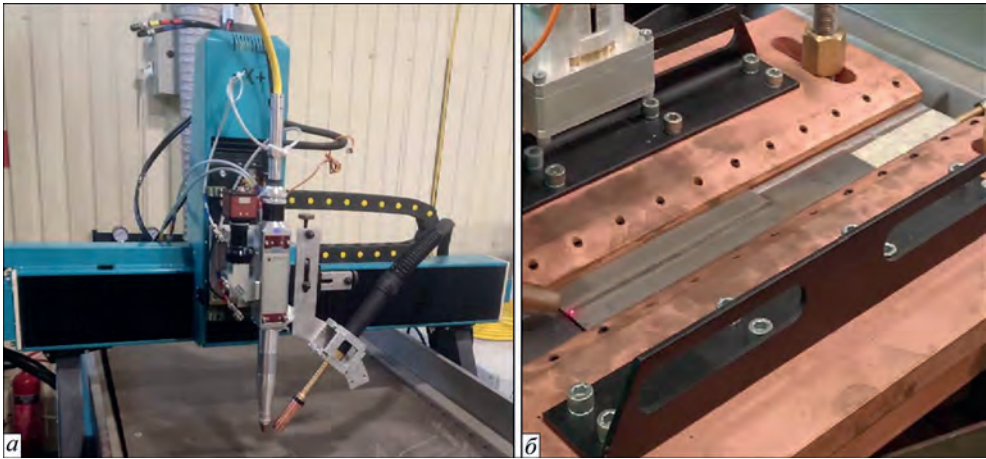


Рис. 1. Стенд (а) для проведення експериментів із лазер-P-MIG зварювання і струбцина (б) із зразком після зварювання

ліфи. Геометричні параметри швів (ширину B , висоту підсилення a , глибину проплавлення h , площу поперечного перерізу S) визначали на цих макрошліфах з точністю $\pm 0,1$ мм. Оцінювали також кількість та діаметр пор і порожнин у швах. При виготовленні макрошліфів структуру швів виявляли шляхом хімічного травлення у розчині, який складався з трьох кислот – $\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{HF}$ у співвідношенні 18:4:1. Мікроструктури швів виявляли згідно рекомендаціям роботи [12]. Одержані структури досліджували за допомогою мікроскопу «Neophot-32» при збільшеннях $\times 50 \dots \times 1000$. Механічні випробування на статичне одновісне розтягнення проводили згідно вимог ГОСТ 6996-66 із застосуванням універсального сервогидравлічного випробувального комплексу MTS 318.25 (США, Material Test System) з максимальним зусиллям 250 кН.

Результати дослідження зварювання алюмінієвих сплавів. Дослідження проводили шляхом зварювання встик без розробки крайок зразків алюмінієвого сплаву 1561 обраного розміру. При цьому обрали наступні діапазони варіювання параметрів режимів зварювання:

– P-MIG зварювання – струм зварювання $I = 100 \dots 200$ А, напруга на дузі $U = 16 \dots 24$ В, швидкість процесу $V = 0,42; 0,5; 0,75; 1,0$ м/хв, швидкість подачі присаджувального дроту $V_{\text{др}} = 4 \dots 12$ м/хв;

– лазер-P-MIG зварювання – потужність випромінювання $P = 1, 2, 3, 4$ кВт, швидкість процесу $V = 0,5; 0,75; 1,0$ м/хв, діапазони інших параметрів режиму аналогічні P-MIG зварюванню.

Значення погонних енергій процесів одностороннього зварювання металу підраховували по формулах:

– P-MIG зварювання $E_{\text{MIG}} = 0,72IU / V$, кДж/см; де 0,72 – ефективний ККД дуги з плавким електродом в аргоні [13, 14];

– лазерного зварювання $E_{\text{las}} = 0,75P / V$, кДж/см; де 0,75 – ефективний ККД зварювання Nd:YAG-лазером [15];

– лазер-P-MIG зварювання $E_{\Sigma} = E_{\text{las}} + E_{\text{MIG}}$

Спочатку за критерієм якості формування шву було підібрано режим P-MIG зварювання (рис. 2, а). Після цього аналогічним чином було підібрано режим лазер-P-MIG зварювання (рис. 2, б). Порівняння цих швів показало, що у разі застосування лазер-P-MIG зварювання шов звужується у $\sim 1,7$ разів. Подальші дослідження показали, що шви звужуються в середньому у 1,5...2,0 рази. При цьому погонна енергія зварювання зменшується приблизно у 2 рази порівняно із P-MIG зварюванням, а швидкість зварювання – збільшується понад 2 рази. Такий результат свідчить про перспективність заміни P-MIG зварювання лазер-P-MIG зварюванням і необхідність більш детально порівняти ці процеси.

Спроба виконати лазерне зварювання сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) показала проблеми із досягненням повного проплавлення, пов'язані із недостатньою густиною потужності використаного Nd:YAG-лазера, випромінювання якого фокусувалося у пляму діаметром близько 0,5 мм. Крім того, була встановлена необхідність використання присаджувального матеріалу для усунення провисання шва і формування верхнього підсилення (рис. 3).

Встановлено, що в умовах P-MIG процесу в діапазоні швидкостей зварювання 0,5...0,75 м/год та подачі електродного дроту 7,5...9,3 м/хв не вдається повністю проплавити сплав 1561 товщиною 6 мм. У той самий час при тих же режимах гібридний процес лазер-P-MIG зварювання дозволяє отримати повне проплавлення зварювального металу за рахунок наявності сфокусованого лазерного випромінювання потужністю 4 кВт (табл.2).

Проте, крім очевидного впливу лазерного випромінювання на глибину проплавлення і формування шва при проведенні технологічних досліджень було встановлено його вплив на напругу на дузі та зварювальний струм. Встановлено, що незалежно від швидкості подачі дроту (у діапазоні від 7,5 до 13,2 м/хв) лазерне випромінювання потужністю 4 кВт збільшує на 1...2 В напругу на дузі (і, відповідно, довжину дуги) та зменшує на 10...15 А зварювальний струм (рис. 4). Зі збіль-

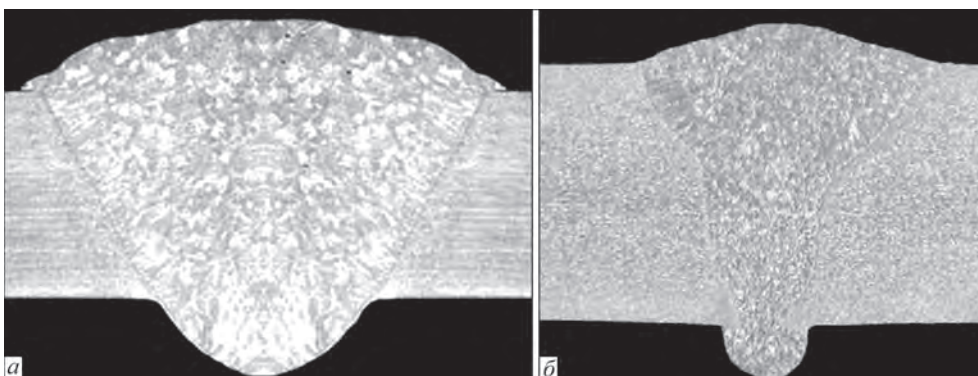


Рис. 2. Макроструктура швів отриманих різними способами зварювання сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм): а – P-MIG ($I \approx 200$ А; $U = 22,5$ В; $V = 0,42$ м/хв; $E_{\text{MIG}} \approx 4,8$ кДж/см); б – лазер-P-MIG зварювання ($P = 3,0$ кВт; $I = 75$ А; $U = 17$ В; $V = 1,0$ м/хв; $E_{\Sigma} = 2,4$ кДж/см)

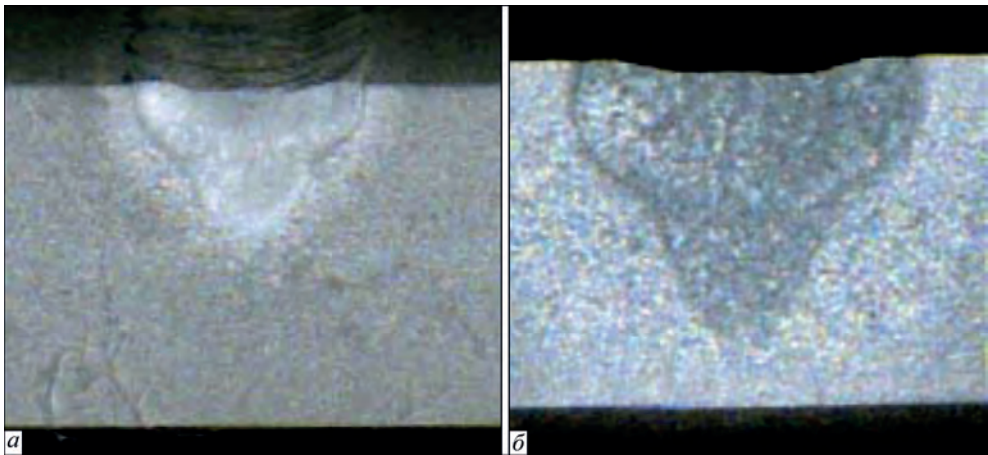


Рис. 3. Макроструктура наплавочних швів, отриманих лазерним зварюванням сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм): *a* – $P = 3,0$ кВт; $V = 0,6$ м/хв; $E_{\text{las}} \approx 2,3$ кДж/см; *б* – $P = 4,0$ кВт; $V = 0,5$ м/хв; $E_{\text{las}} \approx 3,6$ кДж/см

Таблиця 2. Геометрична форма наплавочних швів у сплаві 1561 ($\delta = 6$ мм) в залежності від швидкості зварювання та подачі електронного дроту у Р-MIG та лазер-Р-MIG процесах

Режими зварювання		Р-MIG зварювання	Лазер-Р-MIG зварювання ($P = 4$ кВт)
Швидкість зварювання, м/хв	Швидкість подачі дроту, м/хв		
0,5	7,5		
	8,3		
0,75	8,3		
	9,3		
1,0	10,9		
	12,2		

шенням потужності лазерного випромінювання від 1 до 4 кВт при незмінній подачі електродного дроту також спостерігається залежність збільшення напруги на дузі та зменшення зварювального

струму (табл. 3). При цьому водночас спостерігається збільшення сумарного показника $h + a$ (глибини проплавлення h і висоти підсилення шва a) і

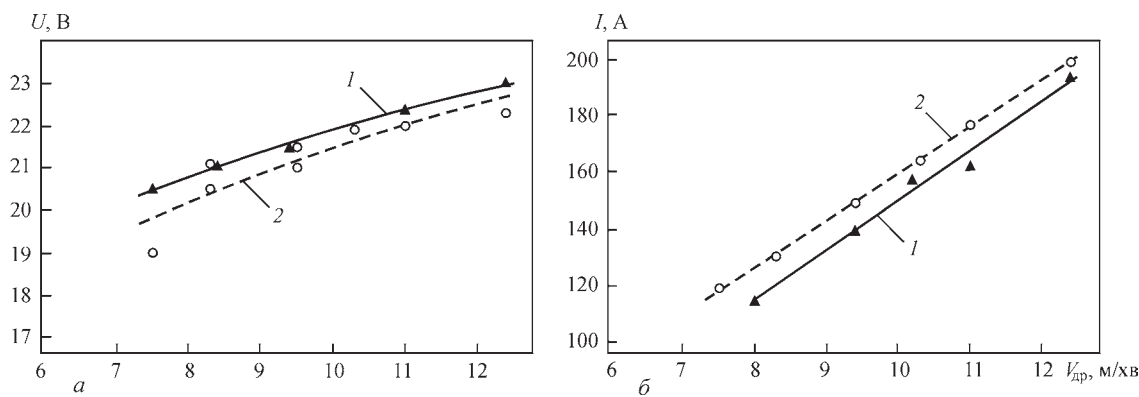


Рис. 4. Залежності зміни напруги на дузі U , В і зварювального струму I , А від швидкості $V_{др}$, м/хв подачі електродного дроту при лазер-Р-MIG (1) зварюванні із 4 кВт лазерного випромінювання і Р-MIG зварюванні (2)

ширини шва B при лазер-Р-MIG зварюванні порівняно із Р-MIG зварюванням (рис. 5).

Проведені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона попередні дослідження показали [16], що з підвищенням струму при зварюванні плавким електродом в інертних газах середня температура крапель електродного металу підвищується, досягаючи значень темпера-

тури кипіння алюмінієвого сплаву з якого виготовлено дріт. При цьому відбувається випаровування металів із порівняно низькою температурою пароутворення – таких як магній, літій, цинк тощо. Зниження вмісту магнію в металі шва на один відсоток призводить до зменшення міцності з’єднання на 10...20 МПа. Проведені дослідження пока-

Таблиця 3. Макроструктури наплавочних швів, отриманих при Р-MIG і лазер-Р-MIG зварюванні алюмінієвого сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) ($V = 0,5$ м/хв; $V_{др} = 8,3$ м/хв)

Зварювальний струм I , А	Напруга на дузі U , В	Потужність випромінювання P , кВт	Результат
135	18,7	0	
135	18,7	1	
126	18,6	2	
130	20,0	3	
128	20,5	4	

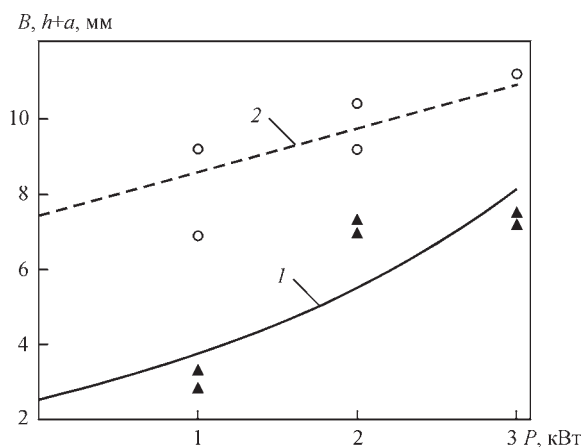


Рис. 5. Вплив зміни лазерної потужності P , кВт при лазер-Р-MIG зварюванні ($V = 0,5$ м/хв; $V_{др} = 8,3$ м/хв) сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) на збільшення сумарного показника глибини проплавлення h із висотою підсилення шва a (1) і ширини шва B (2)

зали, що при Р-MIG зварюванні у дослідженому діапазоні струмів вміст магнію в металі швів може знижуватися до 25 % відносно даних табл. 1, а у разі лазер-Р-MIG зварювання – до 15 %. Вірогідно, це пов'язано із значним (до 3 разів) зменшенням об'єму зварювальної ванни.

Висока середня температура крапель електродного металу при зварюванні плавким електродом марки 1561 (незалежно від складу захисного газу) призводить до випаровування легуючих елементів та забруднення робочої зони зварювальними аерозолями складного хімічного складу, які вміщують ряд токсичних компонентів твердої фази – Al_2O_3 , MgO та MnO_2 . Визначення кількості аерозолів виконувалося по наступній методиці. Повітря із зони зварювання на відстані 20 см від дуги відбирали електроаспіратором моделі 822 зі швидкістю 12...15 л/хв через попередньо зважені фільтри АФА-ВП-20. Кількість твердих аерозолів в повітрі робочої зони вимірювали гравіметричним методом. Вміст Al_2O_3 , MgO та MnO_2 встановлювали за методикою, описаною в роботі [17].

Загальна кількість аерозолів при Р-MIG зварюванні, в першу чергу, залежить від густини зварювального струму на електродному дроті. Чим більша густина струму, тим більше аерозолів утворюється навколо зварювальної ванни. У досліджуваному діапазоні режимів густина струму становила 50...90 А/мм², при цьому концентрації відповідних зварювальних аерозолів становили: $K_{Al_2O_3} = 125...145$ мг/м³, $K_{MgO} = 14...17$ мг/м³, $K_{MnO_2} = 1,9...2,2$ мг/м³. При лазер-Р-MIG зварюванні зміни концентрації зазначених зварювальних аерозолів встановлено не було.

При гібридному лазер-Р-MIG процесі дуже добре спостерігається прояв свічення сфокусованого лазерного випромінювання у середовищі концентрованих аерозолів навколо області дії зварювальної дуги. З підвищенням швидкості плавлення дро-

ту (зварювального струму) збільшується кількість крапель електродного металу та об'єму продуктів, які випаровуються з них. Це підвищує густину газового середовища у прикатодній області. Крім того, зварювальна ванна на алюмінієвих сплавах має вигляд своєрідного дзеркала, яке збільшується у розмірах з підвищенням зварювального струму. Це викликає збільшення втрат лазерного випромінювання у неоднорідному крапельно-аерозольному середовищі навколо ванни та підвищення його віддзеркалювання від самої ванни. В результаті знижується частка поглинутого лазерного випромінювання і ефективна лазерна потужність, що діє безпосередньо на зварюваний метал, тобто знижується ККД лазерної складової процесу лазер-Р-MIG зварювання. Відповідно, результатом є зменшення глибини проплавлення і зміна геометричних параметрів сформованих швів.

Дослідження впливу швидкості подачі електродного дроту на геометричні параметри наплавочних швів при Р-MIG та лазер-Р-MIG зварюванні показали наступне. При одних і тих же швидкостях зварювання ($V = 0,5$ м/хв) і подачі дроту ($V_{др} = 7,5...9,3$ м/хв) гібридний лазер-Р-MIG процес дозволяє порівняно з Р-MIG підвищити на 50...60 % ширину швів при одночасному зменшенні висоти підсилення на 10...60 % (відповідно збільшенню величини $V_{др}$). Аналогічні залежності спостерігаються й при більших швидкостях зварювання, але при менших абсолютних значеннях геометричних параметрів швів.

Як показали проведені дослідження, введення лазерного випромінювання потужністю P у Р-MIG процес призводить до збільшення глибини проплавлення (рис. 5). Однак, порівняння погонних енергій Р-MIG і лазер-Р-MIG зварювання показує, що процес збільшення глибини проплавлення (точніше сумарного показника $h + a$) є неперервним і має спільну тенденцію (рис. 6). Згідно цієї тенденції збільшення показника $h + a$ є прямо пропорційним вкладеній погонній енергії зварювання. Натомість, зміна ширини швів і площі їх перерізу залежить від наявності лазерного випромінювання. Так, при лазер-Р-MIG зварюванні із однаковою погонною енергією ширина швів зменшується на 30...40 % порівняно із шириною швів при Р-MIG зварюванні (рис. 6), що пояснює зменшення приблизно втричі площі переплавленого металу при цьому (рис.7, а). Водночас, зростання площі переплавленого металу зі збільшенням лазерної потужності P при лазер-Р-MIG зварюванні (рис.7, б) свідчить про збільшення глибини проплавлення за рахунок дії випромінювання.

Що стосується характерних дефектів швів у вигляді внутрішніх пор та порожнин, то їх кількість і розміри неважко зменшити до прийнятного рівня у

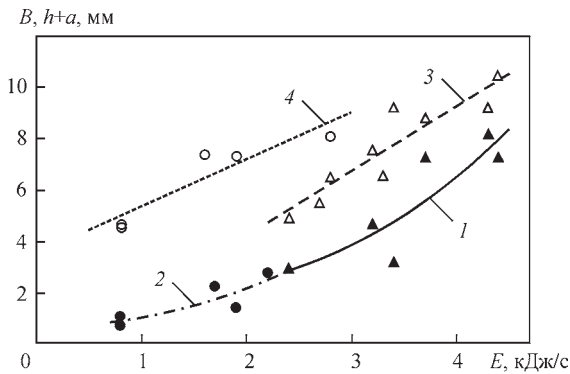


Рис. 6. Вплив погонної енергії E , кДж/см процесів зварювання сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм) на сумарне значення глибини проплавлення h із підсиленням шва a (1, 2) і на ширину шва B (3, 4): 1, 3 – лазер-Р-MIG ($P = 4$ кВт); 2, 4 – Р-MIG

разі застосування попереднього шабрення крайок і хімічного травлення електродного дроту, а також забезпечення надійного газового захисту зварювальної ванни. В умовах проведення експериментів внутрішні пори діаметром 0,2...0,8 мм спостерігалися у кількості порядку 5...10 шт/100 мм шва. Схильність до тріщиноутворення при отриманні з'єднань дослідженими способами зварювання встановлена не була. Дослідження мікроструктур швів, одержаних лазерним, Р-MIG і лазер-Р-MIG зварюванням показали залежність структури швів від способу зварювання, яка може бути визначена через дендритний параметр (рис. 8). У разі лазерного зварювання дендритний параметр становить до 8 мкм (рис. 8, а), при лазер-Р-MIG зварюванні – збільшується до 10 мкм (рис. 8, б), при Р-MIG – становить 13...15 мкм (рис. 8, в).

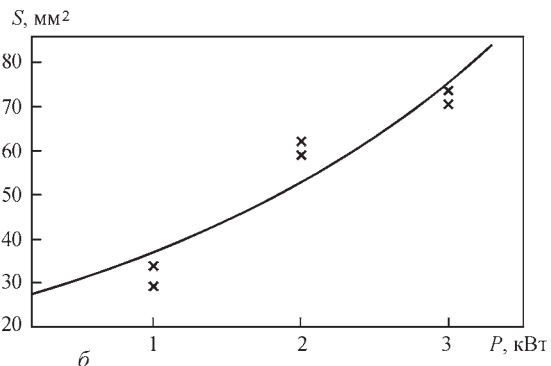
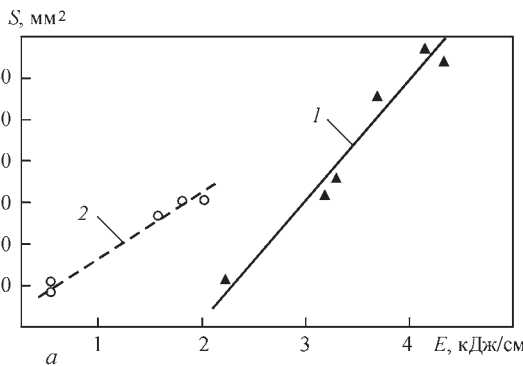


Рис. 7. Вплив погонної енергії E , кДж/см (а) і потужності лазерного випромінювання P , кВт (б) на площу S , мм² поперечного перетину швів при лазер-Р-MIG зварюванні сплаву 1561 ($\delta = 6$ мм)

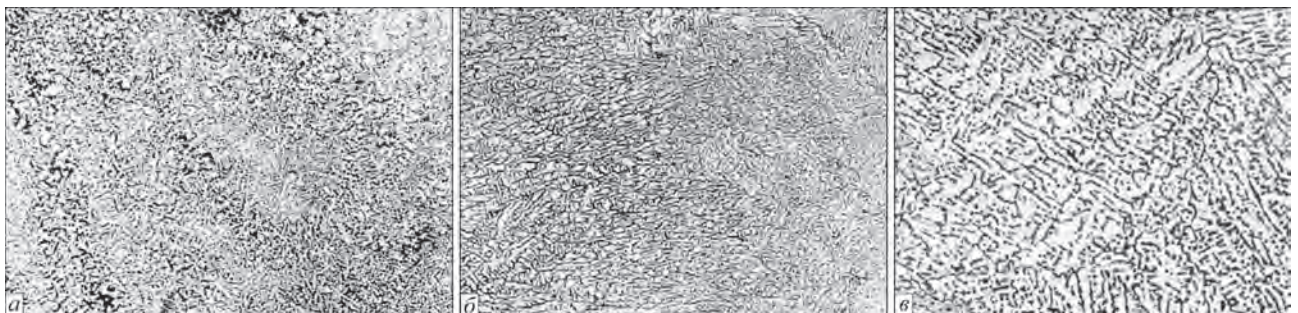


Рис. 8. Мікроструктура металу швів сплаву 1561, отриманих способами зварювання ($\times 250$): а – лазерним; б – лазер-Р-MIG; в – Р-MIG

Мікроструктура металу швів при всіх досліджуваних способах зварювання переважно залежить від способу та режиму зварювання. Будова металу шва визначається формою і розмірами зерен та їх внутрішньою будовою, а також формою, розмірами та розташуванням хімічних сполук, які виділяються при кристалізації. При близьких розмірах зерен, отриманих лазер-Р-MIG та Р-MIG зварюванням, гілки дендритів можуть бути як тонкими (у випадку лазер-Р-MIG, рис. 8, б) так і товстими (при Р-MIG, рис. 8, в), а евтектичні включення – відповідно дрібними або великими.

Сформована структура відповідним чином впливає на механічні властивості отриманих зварних з'єднань. Випробування на статичне розтягування показало, що Р-MIG зварювання дозволяє досягти значень тимчасового опору руйнування 314...323 МПа, а лазер-Р-MIG зварювання – 327...336 МПа. В усіх випадках руйнування відбувалося по зоні сплавлення швів з основним металом. З урахуванням міцності основного металу (~350 МПа) можна вважати, що Р-MIG зварювання забезпечує міцність з'єднань на рівні 90...92 %, а лазер-Р-MIG – 93...96 %.

Обговорення результатів досліджень зварювання алюмінієвих сплавів. Досліди показують, що при поєднанні лазерного і Р-MIG процесів зварювання в один спільний, вплив сфокусованого лазерного випромінювання, в першу чергу, здійснюється створенням парогазового каналу (key-hole), а вплив дуги плавкого електрода – покращенням поглинання лазерного випромінювання,

створенням ванни певної ширини, привнесенням додаткового металу і формуванням швів із певними геометричними параметрами. Зі збільшенням потужності лазерної і дугової складових спільного процесу збільшується густина випаровування зі зварювальної ванни і викидів з неї бризок. Це призводить до збільшення концентрації шкідливих зварювальних аерозолів і зниження ефективності дії лазерного випромінювання через його розсіювання, віддзеркалювання від ванни та інші втрати потужності. У свою чергу, Р-MIG зварювання характеризується вдвічі більшою погонною енергією і приблизно у 2...3 рази більшою шириною швів, ніж лазер-Р-MIG зварювання (рис. 2), що може призводити до більших значень параметрів залишкового напружено-деформованого стану зварних конструкцій. Проте, правильний вибір параметрів режимів здатний забезпечити прийнятні результати при застосуванні кожного з розглянутих процесів.

Одним з найбільш важливих факторів, що впливає на глибину проплавлення при лазер-Р-MIG зварюванні, є співвідношення потужностей лазерної та дугової складових зі швидкістю процесу. Так, при зварюванні із швидкістю 60 м/год збільшення швидкості подачі електродного дроту з 10,9 до 12,2 м/хв (відповідно з $I = 162$ А, $U = 22,4$ В до $I = 194$ А, $U = 23$ В) майже не вплинуло на збільшення глибини проплавлення, проте збільшило ширину шва з $B = 10,1$ мм до $B = 13,5$ мм (табл. 2). Це пов'язано із заливанням парогазового каналу (keyhole) рідким металом електродного дроту, яке здійснюється крапельним способом і є протифазним автоколиванням парогазового каналу (keyhole). В інших випадках, наприклад, при лазер-Р-MIG зварюванні зі швидкістю 45 м/год, крапельне перенесення електродного металу співпадає з автоколиваннями парогазового каналу (keyhole) і сприяє значному підвищенню глибини проплавлення при збільшенні швидкості подачі електродного дроту з 8,3 ($I = 123$ А, $U = 21,1$ В) до 9,3 ($I = 142$ А, $U = 21,1$ В) м/хв (табл. 2).

Зростання напруги на дузі із одночасним зменшенням зварювального струму під впливом лазерного випромінювання при Р-MIG зварюванні (рис. 4), в першу чергу, пов'язано з підвищенням іонізації прикатодної області зварювальної дуги випромінюванням і з відповідною зміною вольт-амперних характеристик дуги. Крім того, поглиблення зварювальної ванни за рахунок утворення сфокусованим лазерним випромінюванням парогазового каналу призводить до певного подовження дуги, що викликає зростання напруги на дузі (до 0,5...1,0 В). Водночас додаткова іонізація зони дії стовпа дуги може призводити до певного (~10 А) зниження зварювального струму. Ця тенденція прямо пропорційна збільшенню потужності лазерного випроміню-

вання і стає помітною при її значенні понад 1 кВт при дуговій потужності порядку 2 кВт.

Відсутність збільшення виділення зварювальних аерозолів при переході від Р-MIG до лазер-Р-MIG зварювання може бути пов'язане із двома процесами, які відбуваються під дією лазерного випромінювання. З одного боку, вплив потужності лазерного випромінювання сприяє збільшенню випаровування алюмінію, магнію та інших елементів і утворенню таких аерозолів, як Al_2O_3 , MgO та MnO_2 . З іншого боку, під дією віддзеркаленого від зварювальної ванни лазерного випромінювання анодна область електродного дроту додатково нагрівається і збільшується (тобто збільшується поверхня охолодження утвореної на кінці електродного дроту краплі металу дуговим розрядом). При цьому густина струму знижується, одночасно зменшуючи інтенсивність утворення зварювальних аерозолів.

Основний фактор, який визначає будову мікроструктури швів – це швидкість охолодження при кристалізації. Тому для оцінки структури головним показником процесу зміни швидкості кристалізації металу швів обрали дендритний параметр (рис. 8). Розміри дендритного параметра залежать від співвідношення потужностей лазера та дуги. У дослідженому випадку дендритний параметр лазер-Р-MIG зварювання (10 мкм) був дещо ближчим до випадку лазерного зварювання (8 мкм), ніж Р-MIG процесу (13...15 мкм), що пояснювалось більшою швидкістю зварювання (1,0 м/хв) і меншою погонною енергією (~2,4 кДж/см). Таким зменшенням дендритного параметру можна пояснити підвищення рівня механічних властивостей з'єднань, отриманих лазер-Р-MIG зварюванням (збільшення міцності на 3...4 %).

Висновки

1. Встановлено, що при лазер-Р-MIG зварюванні сплаву 1561 вплив дугового джерела енергії сприяє покращенню поглинання лазерного випромінювання і якісному формуванню підсилення шва, а вплив лазерного джерела призводить до збільшення глибини проплавлення за рахунок утворення парогазового каналу (keyhole) і до зменшення густини струму анодної області дуги на електродному дроті, що зменшує викиди зварювальних аерозолів. При цьому ефективність дії лазерного випромінювання може знижуватися через втрати потужності із крапельним розбризкуванням металу зі зварювальної ванни і заливанням парогазового каналу (keyhole) рідким металом електродного дроту, чого можна запобігти підбором співвідношення швидкості зварювання і лазерної та дугової потужностей.

2. Дія сфокусованого лазерного випромінювання на процес Р-MIG зварювання сплаву 1561 стає помітною починаючи з 1 кВт і проявляється у екс-

понентному збільшенні глибини проплавлення і площі поперечного перетину швів із зростанням потужності. Підвищення потужності лазерного випромінювання призводить до зростання напруги на дузі з 1...2 В при 2 кВт до 0,1...0,3 В при 4 кВт із одночасним зменшенням зварювального струму з 13...15 А до ~ 6 А відповідно, у разі швидкості зварювання 0,5 м/хв.

3. Встановлено, що застосування Р-MIG процесу для зварювання сплаву 1561 товщиною 6 мм потребує погонної енергії 4,5...5,0 кДж/см і дозволяє сформувати регулярну структуру металу швів із дендритним параметром 13...15 мкм і міцністю з'єднань 90...92 % від міцності основного металу. Введення в процес зварювання сфокусованого випромінювання Nd:YAG-лазера потужністю 3,0 кВт дозволяє приблизно вдвічі зменшити погонну енергію, за рахунок чого дендритний параметр зменшується до 10 мкм, а міцність з'єднань збільшується до 93...96 % від міцності основного металу.

Список літератури/References

1. Benedyk, J.C. (2010) 3 – Aluminum alloys for lightweight automotive structures, Ed. by P.K. Mallick. In: *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing, 79–113. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845697822.1.79>
2. Sun, Y. (2023) The use of aluminum alloys in structures: Review and outlook. *Structures*, Vol. 57(5), 105290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105290>
3. Hung, F.-S. (2020) Design of lightweight aluminum alloy building materials for corrosion and wear resistance. *Emerging Materials Research*, 9(3), 750–757. DOI: <https://doi.org/10.1680/jemmr.19.00177>
4. Ambriz, R.R., Mayagoitia, V. (2011) *Welding of Aluminum Alloys*. In: *Book: Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloys*, Ed. by Prof. Zaki Ahmad, 516, 63–86. DOI: <https://doi.org/10.5772/18757>
5. Khaskin, V.Y. (2013) Development of laser welding of aluminium alloys at the E.O. Paton Electric Welding Institute. *The Paton Welding J.*, 5, 51–55.
6. Bushma, A.I. (2015) State-of-the-art of hybrid laser-plasma welding (Review). *The Paton Welding J.*, 8, 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.08.04>
7. Bunaziv, I., Akselsen, O. M., Salminen, A., Unt, A. (2016) Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy. *J. Materials Proc. Technology*, 233, 107–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.02.018>
8. Sánchez-Amaya, J. M., Pérez, T. D., Rovira, L. G., Botana, J. (2009) Laser welding of aluminium alloys 5083 and 6082 under conduction regime. *Appl. Surface Sci.*, 255(23), 9512–9521. DOI: 1 <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.081>
9. Jiang, Z., Hua, X., Huang, L. et al. (2018) Double-sided hybrid laser-MIG welding plus MIG welding of 30-mm-thick aluminium alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 97, 903–913. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1997-7>
10. Babych, O.A., Korzhuk, V.M., Grynyuk, A.A. et al. (2020) Hybrid welding of aluminium 1561 and 5083 alloys using plasma-arc and consumable electrode arc (Plasma-MIG). *The Paton Welding J.*, 1, 7, 11–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.07.02>
11. Krivtsun, I.V., Khaskin, V.Yu., Korzhik, V.N., Luo, Ziyi (2015) Industrial application of hybrid laser-arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, 7, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.07.07>
12. (2018) *Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys, 2 Vols. Ed. by G. E. Totten et al., 1st Edition.* – Boca Raton, CRC Press, 1232 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351045636>
13. DuPont, J. N., Marder, A. R. (1995) Thermal efficiency of arc welding processes. *Welding J.*, 74, 406–416.
14. Hälsig, A., Mayr, P. (2013) Energy balance study of gas-shielded arc welding processes. *Welding in the World, Le Soudage dans le Monde*, 57(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0073-z>
15. De Oliveira, A.F.M., dos S. Magalhães, E., dos S. Paes, L.E. et al. (2023) A thermal analysis of laser beam welding using statistical approaches. *Processes*, 11(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11072023>
16. Levchenko, O.G., Mashin, V.S. (2003) Sanitary-hygienic characteristic of process of consumable electrode inert-gas welding of AMg6 aluminium alloy. *The Paton Welding J.*, 1, 46–48.
17. Cole, H., Epstein, S., Peace, J. (2007) Particulate and gaseous emissions when welding aluminium alloys. *J. of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(9). DOI: <https://doi.org/10.1080/15459620701516162>

INFLUENCE OF SOLID-STATE LASER RADIATION ON THE PROCESS OF PULSED-ARC WELDING OF ALUMINIUM ALLOY 1561

Y. Zhao, X. Wang, Z. Liu, V. Khaskin

Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, China. E-mail: 13826482032@163.com

The results of consumable electrode pulsed-arc welding of aluminium alloy 1561 of 6 mm thickness (P-MIG) with and without addition of focused radiation of the Nd:YAG laser were analyzed. During laser-P-MIG welding, the influence of the arc energy source improves absorption of laser radiation and promotes high-quality formation of the weld reinforcement, and the influence of the laser source leads to an increase in the depth of penetration due to the formation of a vapour-gas channel (keyhole) and to a decrease in the current density of the anode region of the arc on the electrode wire, which reduces emissions of welding aerosols. Factors influencing the effectiveness of laser radiation during laser-P-MIG welding were determined. It is shown that an increase in laser power leads to an increase in arc voltage with a simultaneous decrease in welding current. Formation of high-quality welds by P-MIG welding of alloy 1561 requires an energy input of 4.5...5.0 kJ/cm. Here, a regular structure of the weld metal with the dendritic parameter of 13...15 µm and joint strength of 90...92 % of the strength of the base metal is formed. Introduction of focused radiation of a 3.0 kW Nd:YAG laser into the welding process allows reducing the energy input by approximately half, due to which the dendritic parameter decreases to 10 µm, and the strength of the joints increases to 93...96 % of base metal strength. 17 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

Keywords: aluminum alloy, consumable electrode pulsed arc welding (P-MIG), Nd:YAG-laser radiation, modes, welding aerosols, structures, strength.

Отримано 30.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 04.06.2024

Прийнято 29.07.2024