

ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ КОРОЗИЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ AISI 304 З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРА

В.М. Коржик^{1,2}, В.Ю. Хаскін^{1,2}, А.А. Гринюк², Є.В. Ілляшенко², А.В. Бернацький², С.І. Пелешенко³

¹Китайсько-український інститут зварювання Академії наук провінції Гуандун, Гуандунська ключова лабораторія передових зварювальних технологій, Гуанчжоу, Китай

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

В статті підтверджено наявність синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазера шляхом порівняння площ поперечного перетину проварів, виконаних в пластині AISI 304 ($\delta = 4$ мм) лазерним, плазмовим і гібридним способами при близьких значеннях потужності лазерного випромінювання і плазмової дуги (по ~ 2 кВт). Визначено, що проявлення цього ефекту залежить від швидкості зварювання. При швидкості 2 м/хв перевищення площі перетину гібридного провару суми площин, одержаних лазерним і плазмовим способами, досягає 30 %, а для швидкості 4 м/хв – ~ 20 %. Порівняння погонної енергії лазерного і гібридного процесів зварювання нержавіючої сталі показало, що різниця між ними залежить від товщини зварюваних листів (або глибини провару). Спочатку цей показник зменшується від ~ 100 % для листів з $\delta = 2$ мм до 50 % для листів з $\delta = 6$ мм, а при подальшому збільшенні глибини провару підвищується до 60 %. Характер залежностей фактору відношення площин ϕ , геометрії зварного шва K і глибини проникнення Φ від швидкості гібридного зварювання сталі AISI304 дозволяє рекомендувати діапазон швидкостей 1,5...2,0 м/хв як більш прийнятний за критеріями синергетичного ефекту і глибини проплавлення. Встановлено, що при гібридному зварюванні із використанням випромінювання волоконного лазера плазмова складова сприяє усуненню таких характерних для лазерного зварювання дефектів формування верхнього валику шва, як підрізи та гребінь, тощо. Бібліогр. 19, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: гібридне лазерно-плазмове зварювання, волоконний лазер, нержавіюча сталь, синергетичний ефект, глибина провару, погонна енергія

Часткова (до 50 %) заміна лазерної потужності дуговою в гібридному лазерно-плазмовому процесі при збереженні порівняно невеликої ширини швів може зробити такий спосіб зварювання достатньо привабливим для низки промислових завдань [1]. До таких завдань, наприклад, можна віднести зварювання алюмінієвих панелей для залізничних вагонів і катерів, а також нержавіючих труб для трубопроводів [2]. Через значне зниження вартості обладнання він може вдало конкурувати з лазерним зварюванням, яке на сьогодні отримує все більше розповсюдження. За рахунок підвищення термічної локальності та мінімізації залишкових деформацій порівняно з відомими дуговими способами зварювання, лазерно-плазмовою може використовуватися для виготовлення конструкцій з листових матеріалів товщиною до 6 мм і більше. Така задача є актуальною, зокрема, для зварювання нержавіючих сталей при виготовленні конструкцій для хімічної і харчової промисловості [3].

Гібридні процеси лазерно-дугового зварювання приваблюють спеціалістів через низку таких переваг, як наявність синергетичного ефекту, який допомагає зменшити погонну енергію зварюван-

ня, зниження вимог до підготовки крайок під зварювання, модифікація термічного циклу, яка сприяє усуненню структур загартування і підвищенню пластичності з'єднання тощо [4]. При такому типі зварювання дуга стабілізується наявністю сфокусованого лазерного випромінювання. Однак різні довжини хвилі лазерного випромінювання ініціюють різні механізми стабілізації дуги, що призводить до різниці в одержуваних результатах. Це пов'язано зі значною залежністю коефіцієнта об'ємного поглинання κ_{ω} лазерного випромінювання в дуговій плазмі від довжини його хвилі λ .

В роботі [5] було виявлено, що стабілізуючий ефект дії випромінювання Nd:YAG-лазера можна пояснити двома явищами: поглинанням лазерної енергії плазмою дуги і зміною складу плазми дуги, викликаним сильним випаровуванням матеріалу заготовки. Обидва явища призводять до зниження ефективного потенціалу іонізації плазми і, таким чином, забезпечують більші провідність і стабільність плазмового каналу. Це стабілізує стовп дуги, сприяє подоланню збурень, викликаних зовнішніми силами, та покращує формування кореня шва. В роботі [6] відмічається, що при використанні в

Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Хаскін В.Ю. – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Ілляшенко Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>, Бернацький А.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>, Пелешенко С.І. – <http://orcid.org/0000-0001-6828-2110>
© В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, А.А. Гринюк, Є.В. Ілляшенко, А.В. Бернацький, С.І. Пелешенко, 2021

гібридному процесі короткохвильового ($\lambda \approx 1$ мкм) випромінювання твердотільних (Nd:YAG) або волоконних лазерів поглинання лазерного пучка в дуговій плазмі є малоістотним ($\kappa_{\omega} \sim 1$ м⁻¹). В цьому випадку під впливом висококонцентрованого джерела лазерного нагріву відбувається інтенсивне випаровування металу з поверхні зварювальної ванни, яке значно впливає на склад, теплові, газодинамічні і електромагнітні характеристики плазми дуги і, як наслідок, призводить до зміни її теплової і динамічної взаємодії зі зварюваним металом.

При використанні в гібридних процесах випромінювання CO₂-лазерів ($\lambda = 10,6$ мкм) істотними виявляються обидва механізми взаємодії, а саме: поглинання лазерного випромінювання в плазмі стовпа дуги ($\kappa_{\omega} \sim 100$ м⁻¹ [6]) і випаровування металу з поверхні розплаву під впливом сфокусованого лазерного пучка. В роботі [7] показано, що взаємодія сфокусованого пучка випромінювання CO₂-лазера з плазмою аргонової дуги з тугоплавким катодом призводить до певного зменшення потужності випромінювання, яка доходить до поверхні анода (зварюваної деталі), в результаті часткового поглинання лазерного випромінювання в плазмі стовпа дуги. При цьому рефракція пучка в неоднорідній дуговій плазмі виявляється малоістотною. Потужність, що вкладається в зварюваний метал лазерним пучком при гібридному (CO₂-лазер + TIG) зварюванні, може бути як більше, так і менше потужності, що вводиться в метал при лазерному зварюванні – в залежності від умов поглинання лазерного випромінювання, яке доходить до поверхні металу. Наприклад, формування в зварювальній ванні парогазового каналу сприяє більш ефективному поглинанню лазерного випромінювання, ніж порівняно плоска поверхня розплаву.

Збільшення долі ефективної (тобто такої, що діє на деталь) лазерної потужності при гібридному зварюванні за допомогою CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) може досягатися за рахунок високого вмісту гелію у зварному (захисному) газі. Це сприяє уникненню утворення плазми в зоні зварної ванни, яка поглинає лазерне випромінювання. Високошвидкісне ві-

деоспостереження показало, що випромінювання із довжиною хвилі $\lambda \approx 1$ мкм (Nd:YAG-, дисковий, волоконний лазер) не впливає на електричну дугу так само, як у випадку CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) [8]. Це дозволяє використовувати стандартні газові суміші Ar/CO₂ і спрощує підбір параметрів дугової складової гібридного процесу. Так, в роботі [8] стверджується, що стандартні параметри GMAW можна використовувати в гібридному процесі без істотних коригувань. На рис.1 показано ефект від додавання лазерної потужності 3 кВт до стандартної дуги з плавким електродом. В експерименті виконували наплавлення зі швидкістю 1 м/хв на пластину з низьколегованої вуглецевої сталі дротом Mn4Ni2CrMo (діаметром 1,2 мм), який подався зі швидкістю 9 м/хв з напругою дуги 27,5...33,0 В у захисті газовою сумішшю 98%Ar+2%CO₂. Високошвидкісне відео показало, що у разі додавання випромінювання волоконного лазера потужністю 3 кВт дуга виглядає дещо коротшою і відбувається певне порушення захисного газу. Це порушення викликано викидом пари, що виходить з парогазового каналу зварювальної ванни, і міститься як у додаванні пари металу, так і у змішуванні з киснем з навколишнього повітря. Хоча вплив цього порушення на властивості захисного газу є незначним, воно знижує зварювальний струм на 4...7 % під час гібридного зварювання порівняно з чистим GMAW.

В роботі [9] було встановлено, що зміна напруги на електричній дузі пов'язана із типом лазерного

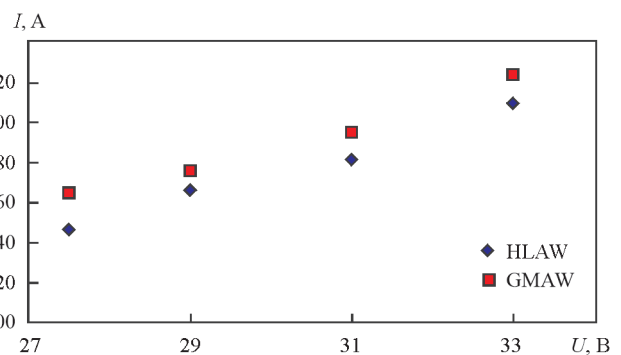


Рис. 1. Залежність зварювального струму від прикладеної напруги для подачі дроту Mn4Ni2CrMo (діаметром 1,2 мм) у випадках гібридного (HLAW) і дугового (GMAW) зварювання [8]

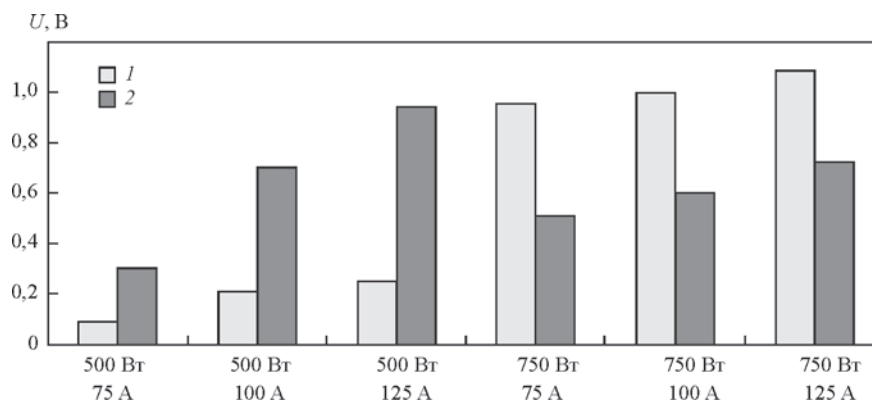


Рис. 2. Різниця напруги при постійній потужності лазера [9]: 1 – CO₂-лазер TIG-гібрид; 2 – Yв:YAG-лазер TIG-гібрид

випромінювання, яке використовується при гібридному зварюванні. Використання CO₂-лазера супроводжується більшим впливом на зміну напруги, який характеризується в її падінні (рис. 2). Також встановлено, що збільшення потужності лазера значно полегшує зміну напруги. При використанні випромінювання CO₂- та Nd:YAG-лазерів помічено практично однакове збільшення площі поперечного перерізу провару при гібридному зварюванні – щонайменше в 1,8 рази порівняно з сумою окремих площ лазерного і дугового (TIG) проварів (рис. 3). Крім того, стверджується, що лазерне випромінювання сприяє кращому формуванню швів (рис. 4).

В останні роки промислове розповсюдження отримали волоконні та дискові лазери. CO₂-лазери застосовують досить обмежено, переважно для різання (так звані щілинні лазери) [10]. В процесах гібридного зварювання також превалюють волоконні та дискові лазери. В якості дугового джерела в таких процесах переважно використову-

ють MIG/GMAW, рідше TIG пальники. Проте, на думку авторів, використання плазмового джерела дозволить підвищити загальний ККД гібридного зварювання за рахунок стиснення дуги неплавкого електрода. Крім того, лазерно-плазмовий процес дозволить уникнути необхідності у виконанні розробки крайок, яке застосовують при гібридному зварюванні сталевих листів товщиною понад 5 мм [11]. Тому дослідницький інтерес становить процес, який поєднує зварювання випромінюванням волоконного лазера із плазмовим зварюванням.

Метою даної роботи є дослідження особливостей процесу лазерно-плазмового зварювання нержавіючої сталі товщиною до 10 мм з використанням випромінювання волоконного лазера в режимі глибокого проплавлення без розробки крайок.

Для досягнення цієї мети вирішувалися наступні задачі:

1) вибір режимів лазерного, плазмового і гібридного зварювання нержавіючої сталі за критері-

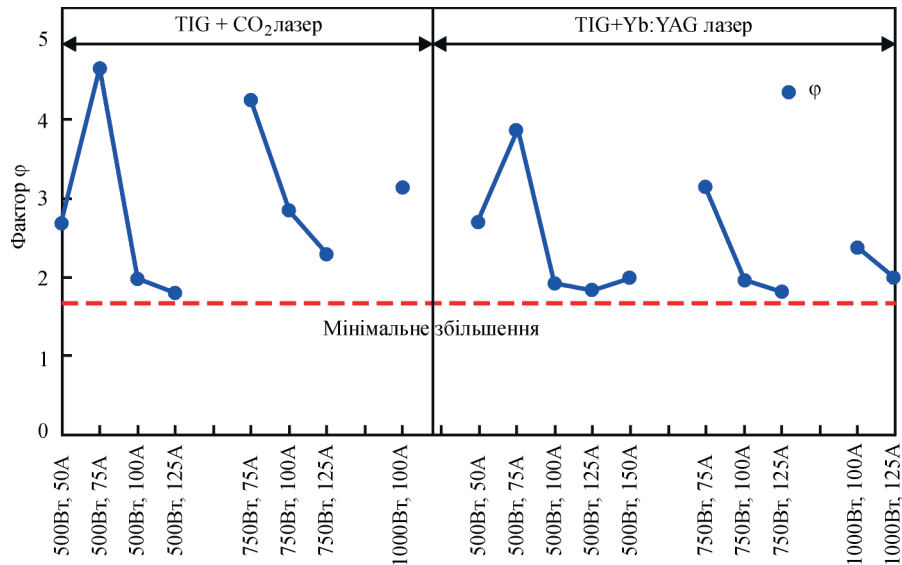


Рис. 3. Фактор $\phi = \frac{A_H}{A_T + A_L}$ як відношення площі поперечного перерізу гібридного провару A_H до суми окремих площ поперечних перерізів TIG (A_T) і лазерного (A_L) проварів [9]

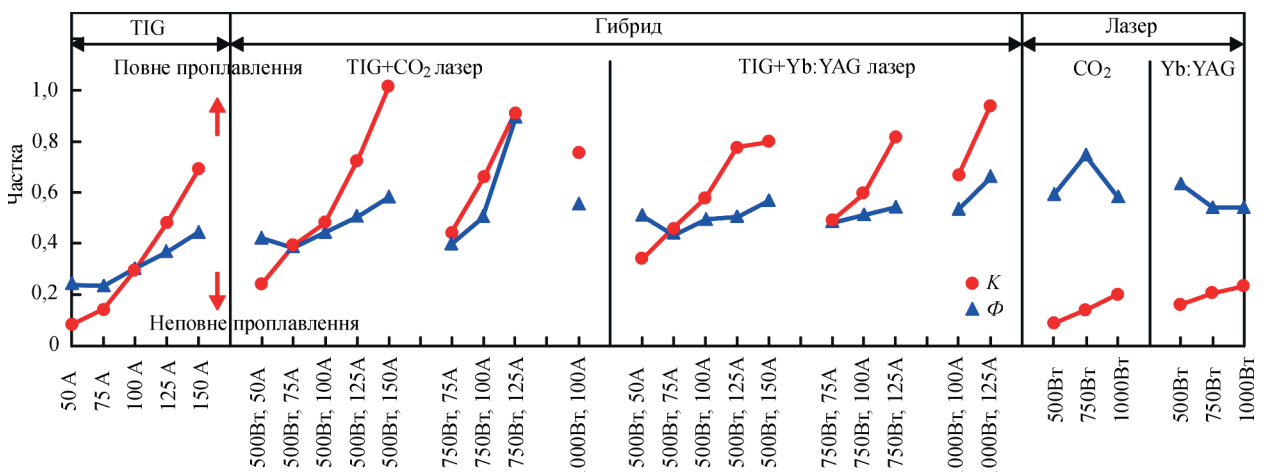


Рис. 4. Зміна параметрів геометрії зварного шва K і глибини проникнення Φ від параметрів зварювання ($K = D/W$, де D – глибина провару, W – ширина шва, $\Phi = D/T$, де D – глибина провару, T – товщина заготовки) [9]

рієм якості формування швів без розробки крайок;

2) порівняння площ поперечного перетину проварів, виконаних трьома досліджуваними способами, для визначення наявності синергетичного ефекту;

3) порівняння погонних енергій лазерного і гібридного процесів зварювання нержавіючої сталі;

4) оптимізація режиму гібридного зварювання по параметрах відношення площин проварів і геометрії швів;

5) визначення відмінності застосування випромінювання волоконного лазера від застосування діодного, Nd:YAG- та CO₂-лазерів.

В якості матеріалу зразків використовували пластини розміром від 100×50×δ мм до 300×100×δ мм з нержавіючої сталі AISI304 товщиною δ = 2, 4, 6 і 10 мм (табл. 1). Зварювання виконували у захисті аргону (витрати ~30 л/хв). В якості плазموутворюючого газу також використовували аргон.

Для проведення експериментів було створено лабораторний стенд, постачений головками для лазерного, плазмового і гібридного зварювання (рис. 5). На першому етапі досліджень виконали дослідження з порівняння впливу на одержувану глибину провару бічного і коаксіального способів подачі захисного газу при зварюванні випромінюванням волоконного лазера. Ці дослідження показали порівняно близькі результати, що свідчить про низький рівень втрат випромінювання в плазмовому факелі, який утворюється над зварювальною ванною.

Крім того, на цьому ж етапі досліджень було встановлено основні технологічні параметри зварювання встик зразків зі сталі AISI304 лазерним і плазмовим способами. Експериментально встановили швидкості зварювання і потужності теплових джерел, при яких спостерігається якісне

формування зварних стикових з'єднань (табл. 2). Також було встановлено, що при лазерному зварюванні листів товщиною до 6 мм використання присаджувального дроту для покращення формування верхнього валика і кореня шва не є обов'язковим. Проте, зі збільшенням товщини зварюваних листів формування верхнього валика може погіршуватися за рахунок утворення підрізів.

На другому етапі досліджень проводили експерименти з гібридного зварювання в діапазоні швидкостей 0,25...4,0 м/хв при лазерній потужності до 2 кВт і струмі зварювання до 100 А. Було встановлено прямо пропорційний вплив потужності лазерного випромінювання на глибину проплавлення і плазмової потужності – на його ширину. Крім того, плазмова складова гібридного процесу сприяла покращенню формування верхнього валика швів і усувала небезпеку утворення підрізів при зварюванні листів товщиною 4...10 мм (рис. 6). Це дозволяє досягати якісного формування швів у всьому діапазоні досліджуваних товщин без застосування присаджувального дроту.

На третьому етапі досліджень визначали наявність синергетичного ефекту, зазвичай характерного для гібридного лазерно-плазмового зварювання. Для цього вимірювали і порівнювали площини поперечного перетину проварів, виконаних в пластині AISI304 (δ = 4 мм) трьома досліджуваними способами на швидкостях 2 і 4 м/хв (рис. 7). При цьому енергетика кожного з цих способів була незмінною і становила: потужність випромінювання $P = 1,6$ кВт, зварювальний струм $I = 80$ А при напрузі на дузі 24 В. Площу S_1 поперечного перерізу гібридного провару порівнювали із сумою площин S_2 і S_3 лазерного і плазмового проварів. У разі зварювання зі швидкістю 4 м/хв плазмовий процес практично не створював провару. Було встановлено,

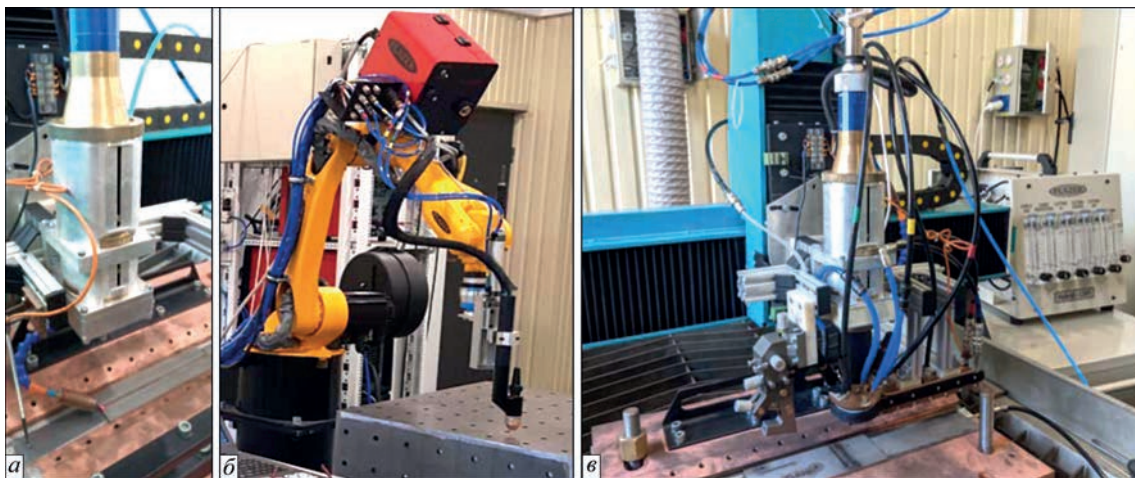


Рис. 5. Зовнішній вигляд лабораторних стендів для проведення технологічних досліджень зі зварювання: а – лазерного; б – плазмового; в – гібридного

Таблиця 1. Хімічний склад пластин зі сталі AISI304, які використовувалися в дослідженнях

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Cu	S	P
Основа	≤0,8	≤0,8	≤0,2	17,0...19,0	9,0...11,0	≤0,5	≤0,3	≤0,02	≤0,035

що при швидкості 2 м/хв площа $S1 = 3,121 \text{ мм}^2$ гібридного провару перевищує суму площин $S2 + S3 = 2,383 + 0,046 \text{ мм}^2$ майже на 30 %, а при швидкості

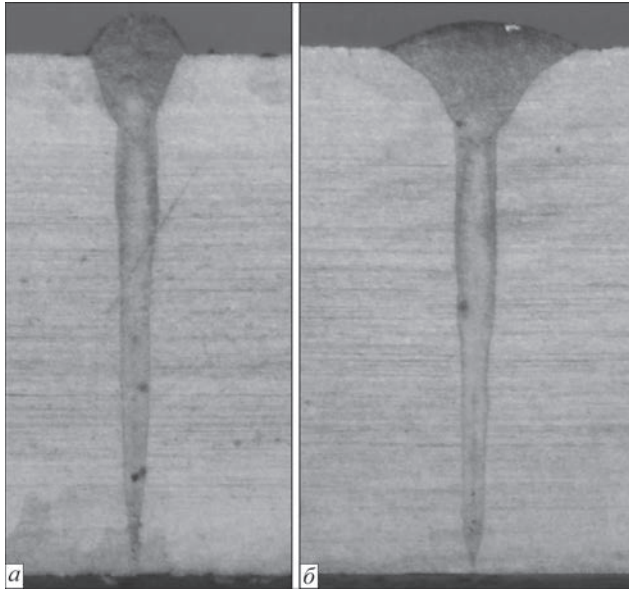


Рис. 6. Поперечні перетини проварів в пластині AISI304 ($\delta = 4 \text{ мм}$), виконані лазерним (а) і гібридним (б) способами зі швидкістю 4 м/хв

4 м/хв (гібрид $1,653 \text{ мм}^2$, лазер $1,32 \text{ мм}^2$, плазмове проплавлення відсутнє) – на $\sim 20 \%$. Це свідчить про безумовну наявність синергетичного ефекту при гібридному зварюванні.

Для порівняння ефективності досліджених лазерного, плазмового і гібридного зварювальних процесів використали значення їхніх погонних енергій E_{las} , E_{pl} і E_{Σ} , Дж/мм. Дані показники визначали як відношення потужності зварювального джерела до швидкості зварювання, помножене на ККД відповідного процесу. Значення ККД брали з рекомендацій літературних джерел. Так, ККД зварювання нержавіючої сталі за допомогою випромінювання волоконного лазера становить близько 75 % [12, 13]. Аналогічним можна обрати ККД плазмового зварювання [14]. Передбачувано, ККД лазерно-плазмового зварювання повинен становити близько 75 %. Це підтверджується дослідженнями авторів роботи [15]. Спираючись на виконані дослідження і наведені значення повного ККД вказаних процесів були одержані дані, внесені в табл. 2.

Виконані дослідження показали, що при зварюванні зразків товщиною 2 мм процес переважно є теплопровідним і не вимагає наявності присаджу-

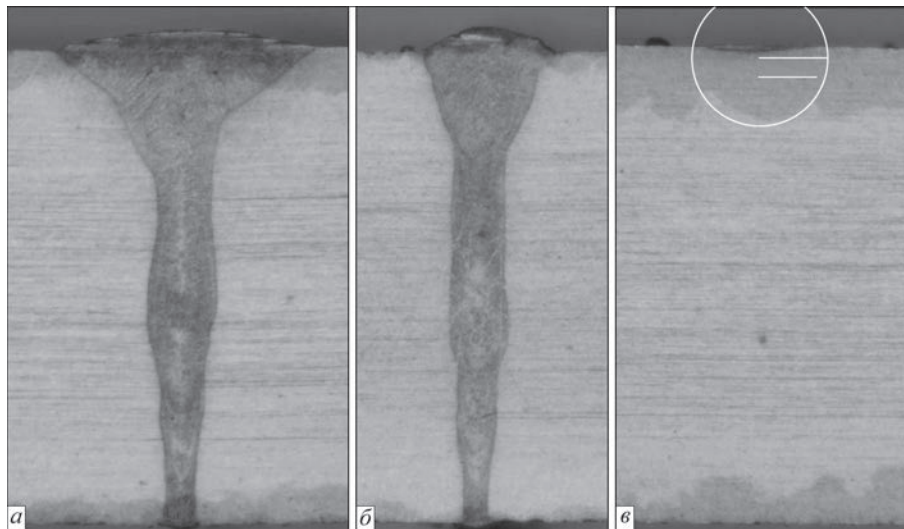


Рис. 7. Порівняння площин поперечного перерізу проварів, виконаних зі швидкістю 2 м/хв в пластині AISI304 ($\delta = 4 \text{ мм}$) гібридним (а), лазерним (б) і плазмовим (в) способами

Таблиця 2. Порівняння ефективності різних способів зварювання сталі AISI304 за критерієм погонної енергії (E , Дж/мм)

Номер п/п	Спосіб зварювання/кількість проходів	Товщина листа δ , мм	Потужність P ($P_{las} + P_{pl}$), кВт	Струм I , А	Напруга на дузі U , В	Швидкість зварювання V , м/хв	$E_{las} + E_{pl}$, Дж/мм	E_{Σ} , Дж/мм
1	Лазер/1	2	0,8	-	-	1,0	36	36
2	Плазма/1	2	2,2	80	28	0,3	336	336
3	Гібрид/1	2	0,8 + 2,2	80	28	1,5	24 + 68	92
4	Лазер/1	4	1,6	-	-	1,0	72	72
5	Гібрид/1	4	1,6 + 2,2	80	28	1,5	48 + 66	114
6	Гібрид/1	4	1,5 + 2,9	95	30	1,5	45 + 87	132
7	Гібрид/1	4	1,8 + 2,0	83	25	1,5	54 + 60	114
8	Лазер/1	6	1,8	-	-	0,8	104	104
9	Гібрид/1	6	1,8 + 2,0	80	25	1,2	71 + 82	153
10	Лазер/2	10	1,8	-	-	0,75	108·2	108·2
11	Гібрид/2	10	1,8 + 2,0	80	25	1,0	(81+90)·2	171·2

вальних матеріалів. При підвищенні товщини зразків до 4 мм і більше формування швів переходить в кинджальне. Для підвищення глибини проплавлення спробували зменшити швидкість зварювання. Проплавлення пластини AISI304 товщиною $\delta = 10$ мм із потужністю випромінювання 2,0 кВт дозволили досягти глибини порядку 7...8 мм при лазерному і 8 мм при гібридному процесі у разі швидкості 0,45 м/хв. В обох випадках подальше зниження швидкості зварювання з 0,45 до 0,25 м/хв не призвело до поглиблення провару. Тому, для одержання стикового з'єднання пластин товщиною $\delta = 10$ мм застосували двопрхідне зварювання, яке виконувалося з двох сторін із перекриттям коренів швів (рис. 8). Подальші випробування на статичний розрив отриманих зразків показали, що міцність одержаних гібридним зварюванням з'єднань знаходиться на рівні 95 % міцності основного металу.

На останньому, четвертому, етапі досліджень виконували порівняння погонних енергій лазерного і гібридного процесів зварювання нержавіючої сталі. Воно показало, що різниця між ними дещо зменшується із збільшенням товщини зварюваних зразків. Так, при зварюванні AISI304 товщиною $\delta = 2$ мм різниця погонної енергії гібридного процесу приблизно вдвічі перевищує енергію лазерного (табл. 2, режими № 1 і № 3), для $\delta = 4$ мм ця різниця складає приблизно 60 % (табл. 2, режими № 6 і № 7), а для $\delta = 6$ мм знаходиться на рівні 50 % (табл. 2, режими № 10 і № 11). Подальше збільшення глибини проплавлення (наприклад, до 8 мм) призводить до збільшення цієї різниці до 60 % (рис. 9). Частково це може бути пов'язано із переходом від теплопровідного процесу зварювання зразків товщиною $\delta = 2$ мм до кинджального процесу, характерного для більших товщин.

В цілому, дослідження лазерно-плазмового зварювання дозволяє заключити, що дія плазми переважно зводиться до наступного: підігрів поверхні зварюваного металу, переплавлення верхньої частини шва, покращення формування верхнього

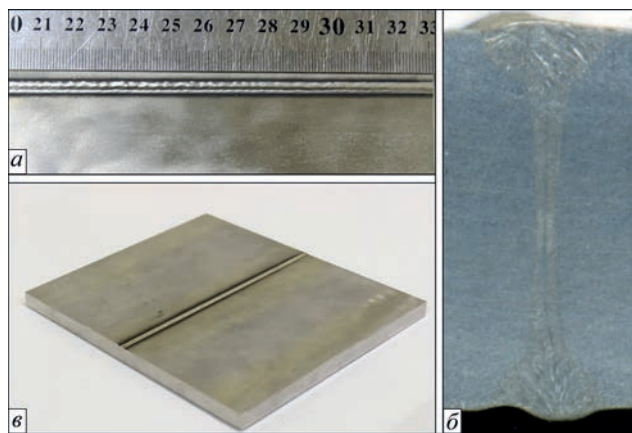


Рис. 8. Двопрхідне гібридне зварювання пластин AISI304 ($\delta = 10$ мм): а – зовнішній вигляд шва; б – поперечний перетин; в – зовнішній вигляд зварного з'єднання

валика. В свою чергу плазмовий підігрів поверхні зварюваного металу сприяє підвищенню коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання, що підвищує ефективний ККД зварювання [16]. Дія випромінювання волоконного лазера в гібридному лазерно-плазмовому процесі зводиться до забезпечення певної глибини проплавлення і формування кореневого валика. Дослідження показують, що як при лазерному, так і при лазерно-плазмовому зварюванні фіксована лазерна потужність дозволяє досягти фіксованої глибини проплавлення. При цьому зниження швидкості менше певного порогу не дозволяє збільшувати цю глибину. Для її підвищення необхідно підвищувати лазерну потужність. Формування кореневого валика зварного з'єднання при гібридному процесі дещо покращується порівняно із лазерним в першу чергу за рахунок збільшення погонної енергії.

Для випадків гібридного процесу з параметрами режиму $P = 1,8$ кВт, $I = 80$ А, $U = 25$ В при використанні волоконного лазера було побудовано графіки залежностей рекомендованих в роботі [9] параметрів геометрії шва від швидкості V зварювання (рис. 10). Характер цих залежностей дозволяє стверджувати, що доцільним є підвищення швидкості зварювання від 1,5 до 2,0 м/хв. Подальше підвищення швидкості дещо погіршує синергетичний ефект гібридного процесу. Проте, при продовженні підвищення швидкості до 4,0 м/хв спостерігається збільшення параметру геометрії зварного шва K , хоча й не таке інтенсивне, як до того, а зменшення фактору ϕ не є надто стрімким. Це дозволяє стверджувати, що в розглянутому випадку лазерно-плазмового зварювання діапазон швидкостей 1,5...2,0 м/хв є найбільш прийнятним.

Порівняння із вище наведених даних із одержаними раніш результатами лазерно-плазмового зварювання з використанням випромінювання діодного і CO_2 -лазера (наприклад, [17]) показує наступне. Випромінювання діодного лазера фо-

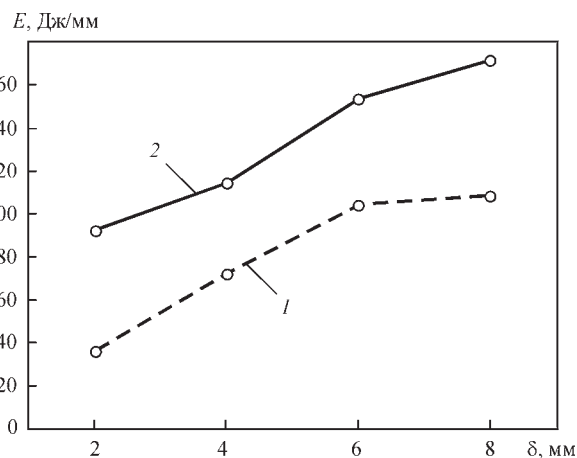


Рис. 9. Залежності погонної енергії E зварювання від товщини зразка δ зі сталі AISI304: 1 – лазерне зварювання; 2 – гібридне зварювання

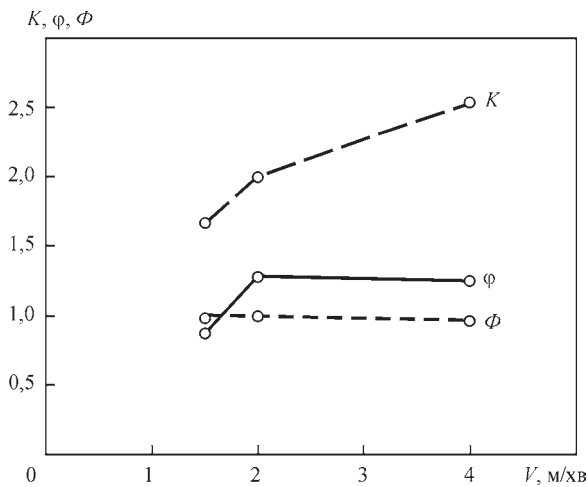


Рис. 10. Залежність фактору відношення площин ϕ , геометрії зварного шва K і глибини проникнення Φ від швидкості гібридного зварювання V сталі AISI304

кусувалося в пляму достатньо великого діаметра ($\sim 1,0$ мм), через що щільність його потужності становила до $2,5 \cdot 10^5$ Вт/см². Менший діаметр плями фокусування випромінювання волоконного лазера (порядку 0,05 мм) дозволяє отримувати більшу щільність потужності (до 10^8 Вт/см²) і значно поглибшати проплавлення порівняно з діодним. В усьому іншому вплив обох типів лазерного випромінювання на гібридний процес є подібним. Аналогічна ситуація спостерігалася у разі використання випромінювання Nd:YAG-лазера, яке фокусували у пляму 0,4 мм (щільність потужності до $3,5 \cdot 10^6$ Вт/см²). Зменшенню глибини проплавлення як при лазерному, так і при гібридному зварюванні випромінюванням Nd:YAG-лазера сприяє також менший коефіцієнт поглинання випромінювання (близько 50 % згідно роботі [18]).

У разі використання випромінювання CO₂-лазера наявний принципово інший механізм його впливу на гібридний процес. Значна доля такого випромінювання поглинається плазмовою складовою лазерно-плазмового процесу, перегріває її, спрямовує до місця впливу на зварювану деталь і забезпечує спільну дію двох теплових джерел. Через це синергетичний ефект лазерно-плазмового процесу при використанні випромінювання CO₂-лазера більш чітко виражений і збільшує площу поперечного перетину швів до 50 % порівняно із сумою площин швів, одержаних окремо лазерною і плазмовою складовими. Проте через менші значення густини потужності випромінювання (до 10^7 Вт/см²) і коефіцієнт його поглинання (на рівні 20...40 % згідно роботі [19]) глибина проплавлення є меншою, порівняно з використанням волоконного лазера як при лазерному, так і при гібридному зварюванні.

Дослідження показали, що у разі близьких показників енергії, яку підводять до зварюваного зразка (потужності випромінювання і плазми ~ 2 кВт кожна при швидкості процесу порядку

1,5 м/хв), використання випромінювання діодного лазера у гібридному процесі дозволяє зварювати листи нержавіючої сталі товщиною ~ 2 мм, використання Nd:YAG-лазера – до 3,5 мм, для CO₂-лазерів ~ 3 мм, а використання випромінювання волоконного лазера – понад 4 мм (орієнтовно 5 мм). У разі лазерного зварювання на тієї ж швидкості із потужністю 2 кВт глибини провару складуть: для випромінювання діодного лазера – до 1 мм, для Nd:YAG-лазера – до 3 мм, для CO₂-лазера – до 2 мм, а для волоконного лазера – понад 4 мм (орієнтовно 4,8 мм). Можна стверджувати, що використання випромінювання, діодного, Nd:YAG-, CO₂- і волоконного лазерів з урахуванням різниці в щільності потужності та коефіцієнтів поглинання при лазерно-плазмовому зварюванні збільшує глибини проварів, відповідно, на 100, 15, 33 та 4 % порівняно із лазерним зварюванням. При цьому ефективність використання волоконного лазера в гібридному процесі перевершує ефективність використання діодного лазера на 60 %, Nd:YAG-лазера – на 30 %, CO₂-лазера – на 40 %. Тому загальний результат застосування випромінювання волоконного лазера у лазерно-плазмовому зварюванні можна вважати найбільш ефективним з позицій глибини проплавлення і підвищення ефективного ККД процесу.

Висновки

1. Підтверджено наявність синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазера шляхом порівняння площі поперечного перерізу проварів, виконаних в пластині із нержавіючої сталі марки AISI304 ($\delta = 4$ мм) лазерним, плазмовим і гібридним (лазерно-плазмовим) способами. Визначено, що проявлення цього ефекту залежить від швидкості зварювання. При швидкості зварювання 2 м/хв з потужністю лазерного випромінювання і плазмової дуги по ~ 2 кВт площа перерізу гібридного провару (3,121 мм²) перевищує суми площі перерізів, отриманих лазерним (2,383 мм²) і плазмовим (0,046 мм²) способами, на 30 %, а для швидкості зварювання 4 м/хв вказане перевищення досягає ~ 20 %.

2. Встановлено, що лазерно-плазмове зварювання нержавіючої сталі з використанням випромінювання волоконного лазера відрізняється від аналогічних процесів з використанням випромінювання діодного, Nd:YAG-, CO₂-лазерів, а саме, – дозволяє збільшити глибину провару при одночасному зменшенні його ширини. Так, при використанні потужності лазера і плазми по ~ 2 кВт при швидкості $\sim 1,5$ м/хв глибина провару з використанням волоконного лазера в гібридному процесі збільшується порівняно з використанням діодного лазера на 60 %, Nd:YAG-лазера – на 30 %, CO₂-лазера – на 40 %.

3. Підвищення глибини провару при гібридно-лазерно-плазмовому зварюванні у порівнянні із лазерним залежить від довжини хвилі випромінювання, щільності потужності та поглинальної здатності зварюваної поверхні. Так, при зварюванні нержавіючої сталі з використанням потужності лазера і плазми по ~ 2 кВт при швидкості $\sim 1,5$ м/хв вклад плазмового джерела енергії підвищує глибину провару при використанні діодного лазера на ~ 100 %, для Nd:YAG-лазера – на 15 %, для CO₂-лазера – на 33 %, а для волоконного лазера – на 4 % (порівняно із лазерним зварюванням тим же випромінюванням ~ 2 кВт при швидкості $\sim 1,5$ м/хв).

4. Порівняння погонних енергій лазерного (E_{las} , Дж/мм) і гібридного (E_{Σ} , Дж/мм) процесів зварювання нержавіючої сталі показало, що різниця між ними залежить від товщини зварюваних листів (або глибини провару). Спочатку показник $E_{\Sigma}/E_{\text{las}}$ зменшується від ~ 100 % для листів з $\delta = 2$ мм до 50 % для листів з $\delta = 6$ мм, а при подальшому збільшенні глибини провару від 6 до 8 мм цей показник підвищується від 50 до 60 %.

5. Аналіз поведінки фактору ϕ (відношення площі поперечного перерізу гібридного провару до суми площ поперечних перерізів плазмового і лазерного проварів), який характеризує синергетичний ефект, показує його зростання в діапазоні швидкостей зварювання сталі AISI304 1,5...2,0 м/хв з подальшим незначним зменшенням в діапазоні 2,0...4,0 м/хв. Параметр геометрії зварного шва K (відношення глибини провару до ширини шва) зростає у всьому проаналізованому діапазоні швидкостей (1,5...4,0 м/хв). Показник глибини проникнення Φ (відношення глибини провару до товщини заготовки) дещо зменшується в цьому діапазоні. Комплексний аналіз поведінки цих трьох параметрів дозволяє рекомендувати для лазерно-плазмового зварювання нержавіючої сталі з використанням випромінювання волоконного лазера діапазон швидкостей 1,5...2,0 м/хв як більш прийнятний за критеріями синергетичного ефекту і глибини проплавлення.

6. При гібридному зварюванні із використанням випромінювання волоконного лазера плазмова складова сприяє усуненню таких характерних для лазерного зварювання дефектів формування верхнього валику шва, як підрізи та гребінь, а також підвищує коефіцієнт поглинання випромінювання за рахунок підігріву поверхні зварюваної деталі. В діапазоні швидкостей 0,25...4,0 м/хв при потужності волоконного лазера від 0,8 до 2,0 кВт і струмі зварювання від 0 до 100 А має місце прямо пропорційне збільшення глибини проплавлення від 2 до 8 мм (залежно від лазерної потужності) і збільшення ширини верхнього валика підсилення від 1,5 до 5,5 мм (залежно від плазмової потужності).

Роботу виконано за підтримки:

– проекту Зони економічного і технологічного розвитку м. Гуанчжоу № 2019GH19 (Project of the Guangzhou Economic and Technological Development Zone 2019GH19), Китай;

– проекту «The National Key Research and Development Program of China (grant number 2020YFE02053000)», Китай;

– проекту Гуандунської академії наук № 2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting», Китай.

Список літератури/References

1. Khaskin, V.Yu., Korzhyk, V.M., Bernatskii, A.V. et al. (2020) Features of synergistic effect manifestation in laser-plasma welding of SUS304 steel, using disc laser radiation. *The Paton Welding J.*, 4, 29–33. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.04.04>
2. Thomy, C., Seefeld, T. (2006) Basics and applications of laser-GMA hybrid welding. *Ibid*, 6, 28–32.
3. Simões, L.M.C. (2010) Design, fabrication and economy of welded structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 40(1), 629–629. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0356-y>
4. Kah, P., Salminen, A., Martikainen, J. (2010) Laser-ARC hybrid welding processes (Review). *The Paton Welding J.*, 6, 32–40.
5. Hu, B., Ouden, G. den. (2005) Laser induced stabilisation of the welding arc. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10, 1, 76–81. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329305X29537>
6. Seyffarth, P., Krivtsun, I. (2002) *Laser-Arc Processes and Their Applications in Welding and Material Treatment*. London, Taylor and Francis Books, 1. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482264821>
7. (2018) *Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка». (2018) *Physical processes in welding and processing of materials. Theoretical study, mathematical modeling, computational experiment*. In: *Transact. of NANU*. Ed. by V.I. Krivtsun. Kiev, IAW [in Russian].
8. Eriksson, I., Powell, J., Kaplan, A. (2013) Guidelines in the choice of parameters for hybrid laser arc welding with fiber lasers. *Physics Procedia*, 41, 119–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.059>
9. Reisgen, U., Krivtsun, I., Gerhards, B., Zabirow, A. (2016) Experimental research of hybrid welding processes in combination of gas tungsten arc with CO₂- or Yb:YAG-laser beam. *Journal of Laser Applications*, 28, 022402. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4944096>
10. Wetzig, A., Herwig, P., Hauptmann, J. et al. (2016) Latest developments of laser cutting. *Journal of Laser Applications, ICALAO 2016*, 103. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5119063>
11. Jokinen, T., Vihervä, T., Riikonen, H. (2000) Welding of ship structural steel A36 using a Nd:YAG laser and gas-metal arc welding. *Journal of Laser Applications*, 12, 185–189. (DOI: <https://doi.org/10.2351/1.1309549>)
12. Sokolov, M., Salminen, A. (2014) Improving Laser Beam Welding Efficiency. *Physics Procedia*, 6(09), 559–571. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2014.69057>
13. Sokolov, M., Salminen, A., Somonov, V., Kaplan, A.F.H. (2012) Laser welding of structural steels: Influence of the edge roughness level. *Optics & Laser Technology*, 44, 7, 2064–2071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.03.025>
14. DuPont, J.N., Marder, A.R. (1995) Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. *Welding J.*, 74, 12, 406–416.

15. Hipp, D., Mahrle, A., Beyer, E. et al. (2019) Thermal Efficiency Analysis for Laser-Assisted Plasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel. *Materials (Basel)*, 12(9):1460, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091460>
16. Khaskin, V.Yu., Korzhik, V.N., Chizhskaya, T.G. et al. (2016) Effect of laser radiation absorption on efficiency of laser welding of copper and its alloys. *The Paton Welding J.*, 11, 31–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.05>
17. Krivtsun, I.V., Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu. et al. (2007) Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys. *Ibid*, 5, 36–40.
18. Fuerschbach, P.W., Eisler, G.R. (2002) Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption. *Science and Technology of Welding and Joining*, 7, 241–246. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217102225004293>
19. Fuerschbach, P.W. (1996) Measurement and Prediction of Energy Transfer Efficiency in Laser Beam Welding. *Welding J.*, 75, 24–34. DOI: <https://doi.org/AC04-94AL85000>

FEATURES OF LASER-PLASMA WELDING OF CORROSION-RESISTANT STEEL AISI 304 USING LASER

V.M. Korzhyk^{1,2}, V.Yu. Khaskin^{1,2}, A.A. Grynuk², E.V. Ilyashenko², A.V. Bernastkyi², S.I. Peleshenko³

¹China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding of the Guangdong Academy of Sciences. Guangdong Key Laboratory of Advanced Welding Technologies, 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

³NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» 37 Peremohy Ave., Kyiv

The paper confirms the presence of synergic effect at laser-plasma welding, using fiber laser, by comparing the cross-sectional areas of beads deposited in AISI 304 plate ($\delta = 4$ mm) by laser, plasma, and hybrid processes at close power values of laser radiation and plasma arc (~ 2 kW each). It is determined that the manifestation of this effect depends on welding speed. At the speed of 2 m/min the hybrid bead cross-sectional area can exceed the sum of areas produced with the laser and plasma processes by up to 30%, and for the speed of 4 m/min by ~ 20 %. Comparison of input energy of the laser and hybrid processes of stainless steel welding showed that the difference between them depends on the welded sheet thickness (or penetration depth). This value first decreases from ~ 100 % for sheets with $\delta = 2$ mm to 50 % for sheets with $\delta = 6$ mm, and at further increase of penetration depth it rises to 60 %. The nature of dependencies of the factor of area ratio ϕ , weld geometry K and penetration depth Φ on the speed of hybrid welding of AISI 304 steel allows recommending the range of speeds of 1.5...2.0 m/min, as a more acceptable by the criteria of synergic effect and penetration depth. It is found that at hybrid welding with application of fiber laser radiation, the plasma component promotes elimination of such defects of weld upper bead formation, characteristic for laser welding, as undercuts and a ridge, etc. 19 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

Keywords: hybrid laser-plasma welding, fiber laser, stainless steel, synergic effect, penetration depth, energy input

Надійшла до редакції 18.10.2021



Cutting World

спеціалізований торговий ярмарок
Messe Essen, 25-27 квітня 2023

**CUTTING
WORLD®**

Після того, як цього року довелося зробити перерву через пандемію, галузь металообробки з нетерпінням чекає фахівців до майбутнього синергетичного поєднання торгової ярмарки та конгресу.

Відомі компанії підтвердили участь у Cutting World 2023. Зараз відкрита реєстрація зі знижкою для раннього бронювання Cutting World. Серед інших, свою участь вже підтвердили Air Liquide, Beosys, Boschert, Expercut, IHT Automation, Mecanumeric, NUM, Mazak, Messer Cutting Systems, STM Waterjet і WBM. Усі вони переконані концепцією Cutting World. Як єдиний вузькоспеціалізований торговий ярмарок у своєму секторі, він об'єднує попит і пропозицію на все, що стосується професійного різання. Тут показані рішення по всьому ланцюжку процесу. Виробники систем кисневого різання, систем плазмового різання, систем лазерного різання та систем гідроабразивного різання – усі вони представляють себе на виставці. На додаток до технологій різання, асортимент включає процеси на початку і після: від підготовки робіт, програмне забезпечення для керування та системи фільтрації, видалення задирок і кромки, а також маркування розрізаних матеріалів. Таким чином, виставка орієнтована насамперед для відвідувачів із секторів листообробної промисловості, а також переробників неметалевих матеріалів. Cutting World представить себе всім їм як барометр трендів. Зрештою, у 2023 р. в центрі уваги буде цифрова мережа виробничих процесів. Особливу додаткову цінність виставці надасть Німецький розкрійний конгрес, який проводитиметься паралельно. Там відомі спікери нададуть інформацію про актуальні теми та інновації, які рухають індустрію.

www.messe-essen.de