

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЯВУ СИНЕРГЕТИЧНОГО ЕФЕКТУ ПРИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОМУ ЗВАРЮВАННІ СТАЛІ SUS304 З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДИСКОВОГО ЛАЗЕРА

В.Ю. Хаскін¹, В.М. Коржик^{1,2}, А.В. Бернацький², А.М. Войтенко², Є.В. Ілляшенко², Д. Сгай¹

¹Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона). 510650, м. Гуанчжоу, Тіаньхе, вул. Чансін, 363, Китай

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

В роботі показано, що при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі SUS304 товщиною 3 мм з використанням випромінювання дискового лазера зафіксовано стабільний прояв синергетичного ефекту і співвідношення потужностей лазерної і плазмової складових 1:1...1:3, що дозволяє збільшити глибину провару приблизно на 25 % без зміни швидкості зварювання. На стабільність синергетичного ефекту і підвищення глибини провару впливають співвідношення потужностей складових процесу, спосіб подачі і склад захисного газу. Для поліпшення ефективності гібридного зварювання при коаксильній подачі захисного та плазموутворюючого газів доцільно використовувати домішок 2...3 % кисню в захисний газ аргон. Стабілізація синергетичного ефекту за рахунок вибору параметрів режиму і складу захисного газу дозволяє замінити до 40 % лазерної потужності плазмовою. Міцність одержуваних гібридним лазерно-плазмовим зварюванням з'єднань з нержавіючої сталі SUS304 становить близько 95 % міцності основного металу. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: лазерно-плазмове зварювання, нержавіюча сталь, синергетичний ефект, технологічні експерименти, глибина провару, співвідношення потужностей, захисний газ

В останні роки спостерігається активний розвиток процесів гібридного лазерно-дугового (лазерно-плазмового) зварювання сталей і сплавів [1, 2]. Інтерес до цих процесів викликаний, в першу чергу, новими технологічними можливостями, що відкриваються за рахунок їх застосування. Це пов'язано з проявом синергетичного ефекту (іноді називають його гібридним ефектом), який виражається в порушенні адитивності теплового впливу випромінювання і дуги на зварюваний метал, інтенсифікації динамічного впливу зварювального струму на ванну розплаву, а також в зміні гідродинаміки самої ванни. В результаті підвищується ефективний ККД процесу зварювання і енергія, використовувана на плавлення металу, може більш ніж в два рази перевищувати суму відповідних енергій, що виділяються в металі при використанні кожного окремо взятого джерела тепла [3].

Однак, як показує ряд досліджень, прояв синергетичного ефекту в гібридних лазерно-дугових процесах не завжди може давати очікуваний позитивний результат, який виражається в збільшенні глибини провару. Наприклад, в роботі [4] показано, що прояв синергетичного ефекту, прив'язка дугової плазми до зони дії лазерного випромінювання і стабільність процесу на високих швидкостях, більшою мірою залежать від ступеня фоку-

сування лазерного випромінювання, ніж від його довжини хвилі (рис. 1). У роботі [5] відзначено, що ефективність гібридного лазер-ТІГ зварювання в значній мірі залежить від виду захисного газу і використовуваної методики захисту. У роботі [6] показано, що при гібридному проплавленні нержавіючих сталей на глибину провару впливають розташування (по ходу зварювання) складових джерел енергії і відстань між ними, а також величина зварювального струму ТІГ складової. Це робить актуальним вивчення питання результативності синергетичного ефекту та стабільності його впливу на збільшення глибини провару.

Метою даної роботи є визначення на підставі дослідження прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі можливостей підвищення глибини проплавлення і часткової заміни потужності лазерного випромінювання плазмовою потужністю.

Для визначення результативності прояву синергетичного ефекту в процесі гібридного лазерно-плазмового зварювання виконували провари і зварювання встик пластин товщиною $\delta = 3,0$ мм зі сталі SUS304 (аналог 08X18H10) в захисті аргону. Наявність наскрізного провару визначалася за критерієм формування зворотного валика шириною не менше 0,5 мм при одночасному якісному

В.Ю. Хаскін – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, В.М. Коржик – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,
А.В. Бернацький – <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>, А.М. Войтенко – <https://orcid.org/0000-0003-4946-6517>,
Є.В. Ілляшенко – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>, Д. Сгай – <https://orcid.org/0000-0003-2249-6097>
© В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, А.В. Бернацький, А.М. Войтенко, Є.В. Ілляшенко, Д. Сгай

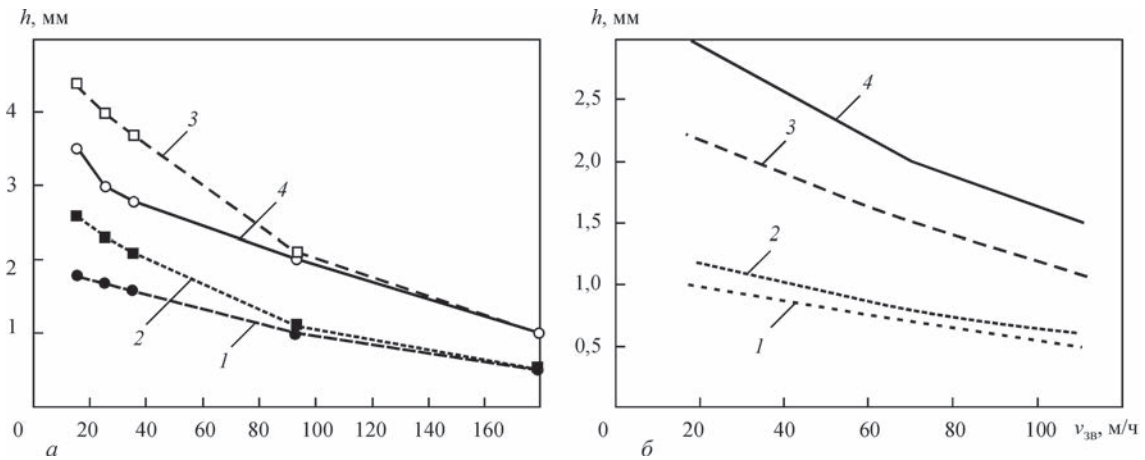


Рис. 1. Залежності глибини проплавлення h від швидкості $v_{зб}$ лазерно-плазмового зварювання з використанням випромінювання діодного лазера [4]: *а* – потужністю 2 кВт і аргонної плазми 2 кВт для нержавіючої сталі SUS321; *б* – потужністю 1,2 кВт і аргонної плазми 0,8 кВт для алюмінієвого сплаву 5083 (*1* – лазерне зварювання; *2* – плазмове; *3* – лазерне + плазмове (арифметична сума значень h); *4* – гібридне)

формуванні верхнього валика. Підрізи і провисання верхнього валика, пори і свищі розглядалися як неприпустимі дефекти формування шва.

Технологічні дослідження процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання проводилися згідно зі схемою, наведеною на рис. 2. В ході експериментів застосовували дисковий лазер з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,03$ мкм, потужність якого змінювали в межах 0,3...1,4 кВт. Діаметр фокальної плями становив близько 0,4 мм. Для досліджень застосовували інтегрований коаксіальний плазмотрон прямої дії зі штирьовими катодами, конструкція якого детально описана в роботі [7]. Потужність стиснутої дуги становила до 2,3 кВт при зварювальному струмі до 80 А. Сфокусоване

лазерне випромінювання і стиснута дуга виводилися спільно через спільне сопло діаметром 2,5 мм на зварюваний зразок, розташований на відстані близько 3 мм від зрізу сопла. Фокальну площину лазерного випромінювання розташовували на глибині близько 0,5 мм щодо поверхні зразка. В експериментах застосовували стиснуту електричну дугу неперервної дії прямої полярності. В якості зразків для зварювання встик і виконання проплавлень використовували листи сталі SUS304 розміром 200×100×3 мм. Інтегрований плазмотрон переміщували щодо зварюваного зразка за допомогою антропоморфного робота KUKA KR30HA (рис. 3).

У зв'язку із зазначеним в роботі [5] впливом виду і способу подачі захисного газу на одержувані результати, проведення експериментів було розпочато з дослідження особливостей подачі захисного газу в зону формування зварювальної ванни. Газ подавали через захисне сопло, виконане коаксіально плазмотворюючому соплу. При цьому використовували два способи: отримання ламінарного потоку аргону і потоку аргону з завихреннями (турбулентностями). Встановили, що при гібридному лазерно-плазмовому

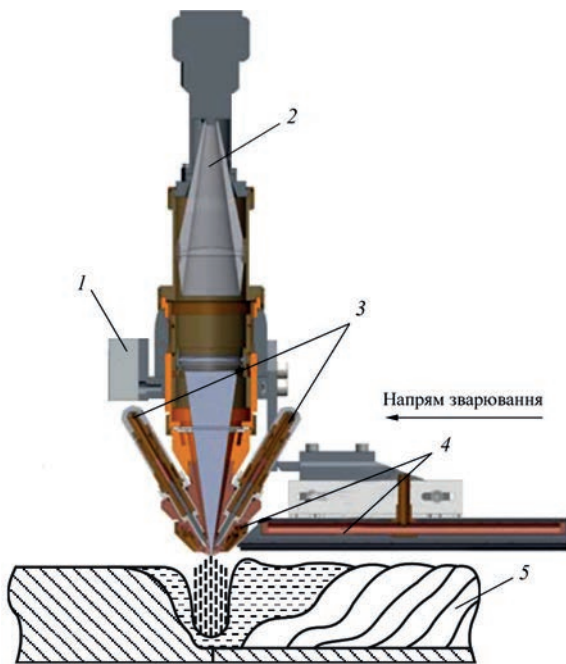


Рис. 2. Схема проведення експериментів: *1* – кріплення інтегрованого плазмотрона на руці робота; *2* – підведення лазерного випромінювання; *3* – катодні вузли; *4* – газовий захист; *5* – зварюваний зразок

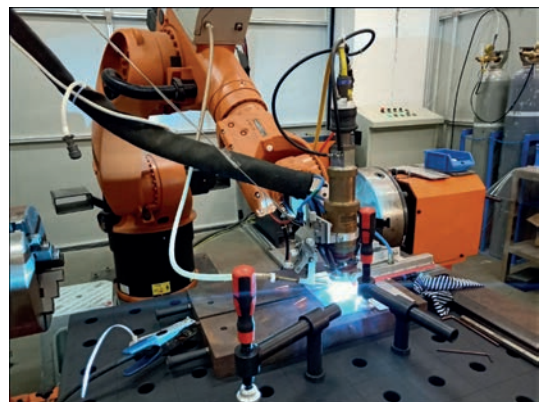


Рис. 3. Зовнішній вигляд стенду для лазерно-плазмового зварювання із застосуванням робота KUKA KR30HA в процесі роботи

зварюванні коаксіальна ламінарна подача аргону призводить до значного (до двох разів) зниження глибини проплавлення і певного збільшення ширини швів у порівнянні з гібридним зварюванням з використанням турбулентної подачі аргону. Це пояснюється попаданням певної кількості атмосферного повітря у зварювальну ванну за рахунок його змішування з аргоном, що подається турбулентним чином. Відзначимо, що таке потрапляння повітря в зварювальну ванну призводить до утворення пор в зварних швах (рис. 4).

З дослідження [8] відомо, що газова композиція на основі аргону, яка включає кисень у кількості приблизно від 0,6 до 1,9 %, дозволяє значно підвищити швидкість зварювання, допуск на стикову крайок і мінімізувати пропалювання при збереженні високих механічних характеристик. Внутрішні пори при цьому не виникають. Також

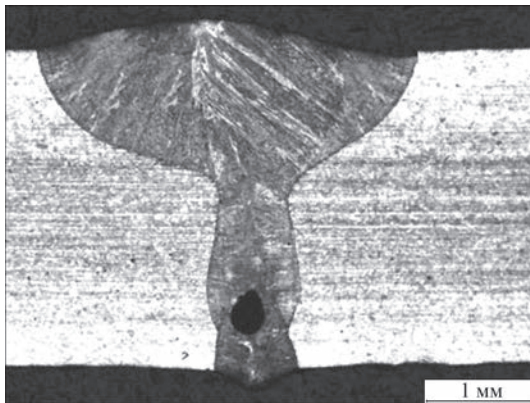


Рис. 4. Структура зварного з'єднання сталі SUS304, отриманого лазерно-плазмовим способом, з утворенням пор в нижній частині шва

відомі роботи, в яких доля кисню в захисному газі при зварюванні складала 3 % і вище. Тому для усунення негативного явища пороутворення при збереженні позитивного ефекту збільшення глибини провару було прийнято рішення в якості захисного газу використовувати суміш аргону з невеликою (2...3 %) домішкою кисню.

Після коригування складу захисного газу на різних режимах був виконаний ряд лазерних, плазмових і лазерно-плазмових проварів в пластині зі сталі SUS304 (рис. 5). Потім були зварені стикові з'єднання (рис. 6). Зі стикових з'єднань вирізали зразки для визначення механічних властивостей отриманих з'єднань. За глибиною і формою проварів, виконаних в пластині зі сталі SUS304, визначали характер прояву синергетичного ефекту і його стабільність. Для цього виконували поперечні перерізи проварів і досліджували їх макроструктури (рис.7). Режими виконання проварів і отриманий результат (величини ширини B верхнього валика і глибини H провару) наведено в таблиці.

В ході проведення експериментів була встановлена висока стабільність прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталі SUS304 в обраному діапазоні потужностей лазерної і плазмової складових за умови дотримання співвідношення цих потужностей близьким до 1:1,0...1:1,5. При зниженні потужності лазерного випромінювання з 1,4 до 0,3...0,4 кВт з одночасним збереженням зварювального струму на рівні 80 А (потужність плазмової складової – близько 2,3 кВт), тобто при співвідношенні потужностей

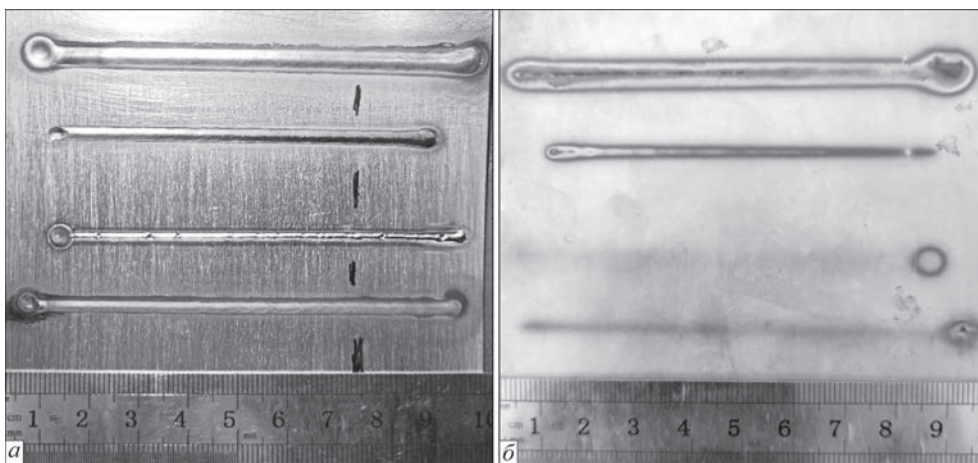


Рис. 5. Зовнішній вигляд проварів в пластині сталі SUS304 товщиною $\delta = 3,0$ мм: a – верхня сторона; b – зворотна сторона

Параметри режимів зварювання і геометричні характеристики проварів в сталі SUS304 ($\delta = 3,0$ мм), виконаних в захисті аргону зі швидкістю 60 м/год (1,0 м/хв)

Номер зразка	Вид зварювання	Потужність випромінювання, кВт	Зварювальний струм, А	Ширина B верхнього валика шва, мм	Глибина H провару, мм	Коефіцієнт форми шва $K = B/H$
D-1	Гібридне	1,4	80	3,94	3,46	1,2
D-2	Лазерне	1,4	–	2,55	2,55	1,0
D-3	Плазмове	–	80	1,83	0,25	7,3
D-4	Гібридне	0,7	40	2,31	1,84	1,3

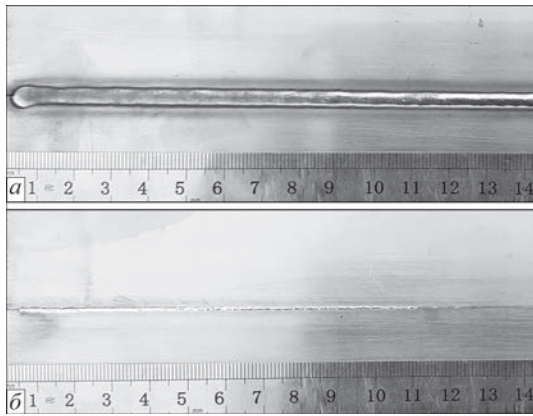


Рис. 6. Зовнішній вигляд стикового з'єднання сталі SUS304 ($\delta = 3,0$ мм): *a* – верхній валик; *б* – корінь шва

порядку 1:6, спостерігалось зменшення глибини провару з одночасним збільшенням його ширини. Форма поперечного перерізу шва при цьому наближалася до форми плазмового проплавлення, що дозволило зробити висновок про зниження стабільності прояву синергетичного ефекту.

Як випливає з таблиці, сума глибин лазерного (зразок D-2) і плазмового (зразок D-3) проварів становить 2,8 мм, тобто близько 20...25 % глибини гібридного лазерно-плазмового провару (зразок D-1). У разі заміни половини (0,7 кВт) лазерної потужності плазмовою (зразок D-4) глибина провару становить близько 75 % від глибини, отриманої при лазерному зварюванні з повною потужністю 1,4 кВт (зразок D-2). Подальші експерименти показали, що при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі з використан-

ням випромінювання дискового лазера можливо замінити 40 % лазерної потужності плазмовою. При цьому співвідношення лазерної і плазмової потужностей в гібридному процесі має становити 1:3. Аналіз коефіцієнтів форми шва показав, що формування швів при гібридному зварюванні значно ближче до лазерного, ніж до плазмового зварювання (таблиця).

Зі зварених лазерно-плазмовим способом з'єднань сталі SUS304 ($\delta = 3,0$ мм) вирізали зразки типу XIII (XIIIa) (ГОСТ 6996-66) для проведення механічних випробувань. Випробування на статичне розтягування виконували за допомогою розривної машини типу MTS Criterion 45 за трьома зразками з подальшим усередненням результатів. Було встановлено, що міцність одержуваних лазерно-плазмовим способом з'єднань становить $\sigma_b \approx 750$ МПа, тобто близько 95 % міцності основного металу SUS304. При цьому відносне подовження $\delta \approx 60$ %, тобто 100 % щодо основного металу.

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. При лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі SUS304 товщиною $\delta = 3,0$ мм з використанням випромінювання дискового лазера зафіксовано стабільний прояв синергетичного ефекту в діапазоні співвідношення потужностей лазерної і плазмової складових 1:1...1:3, що дозволяє збільшити глибину провару приблизно на 25 % без зміни швидкості зварювання, а також замінити до 40 % лазерної потужності плазмовою.

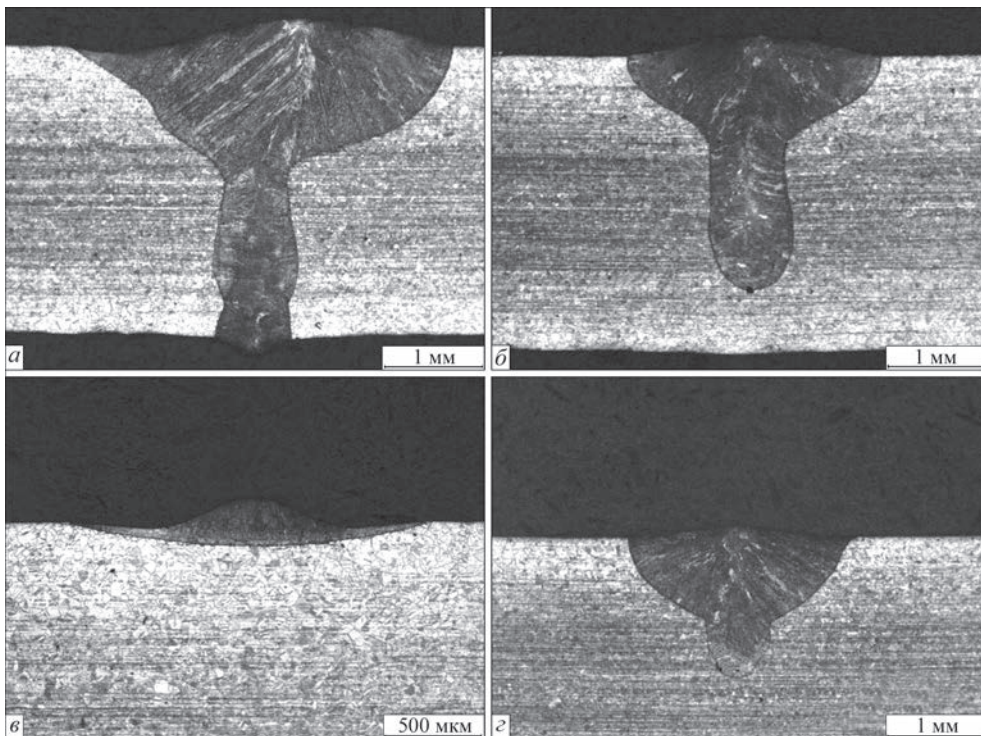


Рис. 7. Макроструктура поперечних перерізів проварів, виконаних в пластині сталі SUS304 товщиною $\delta = 3,0$ мм різними способами: *a* – гібридним (зразок D-1); *б* – лазерним (зразок D-2); *в* – плазмовим (зразок D-3); *г* – гібридним з половинною потужністю (зразок D-4)

2. На стабільність синергетичного ефекту і підвищення глибини провару впливають співвідношення потужностей складових процесу, спосіб подачі і склад захисного газу. Для поліпшення ефективності гібридного зварювання при коаксіальній подачі захисного і плазмоутворюючого газів доцільно використовувати добавку 2...3 % кисню в захисний газ аргон.

3. Міцність одержуваних гібридним лазерно-плазмовим зварюванням з'єднань з нержавіючої сталі SUS304 становить близько 95 % міцності основного металу, а відносно подовження є аналогічним даному параметру основного металу. Для більшості зварювальних завдань наведені показники є задовільними.

Робота виконувалася в рамках проєктів: №2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (науково-дослідні розробки лазерних і плазмових технологій гібридного зварювання та різання)», Guangzhou, China, № 2017GDASCX-0411 Capacity-Building of Innovation – Driven Development for Special Fund Projects програм Академії наук провінції Гуандун (КНР) «Дослідження фізико-хімічних процесів при взаємодії парової плазми з поверхнею металів і розробка наукових основ технології водо-повітряного плазмового різання листових сталей для отримання зварних з'єднань»; 2018A050506058 «Research and application of hybrid laser and arc welding technology with high power on high strength steel for ship building (Дослід-

ження та застосування гібридної технології лазерного та дугового зварювання з високою потужністю на високоміцній сталі для суднобудування)».

Список літератури/References

1. Utsumi A., Matsuda J., Yoneda M., Katsumura M. (2002) Effect of base metal travelling direction on TIG arc behaviour. Study of high-speed surface treatment by combined use of laser and arc welding (Report 4). *Welding International*, 16, 7, 530–536.
2. Cho Won-Ik, Na Suck-Joo (2007) A Study on the Process of Hybrid Welding Using Pulsed Nd:YAG Laser and Dip-transfer DC GMA Heat Sources. *J. of Welding and Joining*, 25, 6, 71–77.
3. Seyffarth P., Krivtsov I.V. (2002) Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment. London, Taylor and Francis Books. (Welding and Allied Processes).
4. Shelyagin V.D., Krivtsov I.V., Borisov Yu.S. et al. (2005) Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies. *The Paton Welding J.*, 8, 44–49.
5. Kah P., Salminen A., Martikainen J. (2010) Laser-arc hybrid welding processes (Review). *Ibid*, 6, 32–40.
6. Naito Y., Mizutani M., Katayama S. (2003) Observation of Keyhole Behavior and Melt Flows during Laser-Arc Hybrid Welding. *Proc. of International Congress of Applications of Laser and Electro-Optics, ICALEO, 2003*, Jacksonville (USA). Jacksonville, LIA, Section A, pp. 159–167.
7. Кривцун И. В., Коржик В. Н., Хаскин В. Ю. и др. (2017) Установка нового поколения для лазерно-микроразмерной сварки. Сб. докл. Восьмой между. конф. «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов». Кривцун И.В. (ред.). Киев, Международная Ассоциация «Сварка», сс. 95–100.
8. Krivtsov, I.V., Korzhik, V.N., Khaskin, V.Yu. et al. (2017) New generation unit for laser-microplasma welding. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing*. Ed. by I.V. Krivtsov. Kiev, IAW, 95-100.
9. William de Abreu Macedo, Vinicius de Oliveira Correia (2006) *Gas composition for arc welding*. Praxair Technology, Inc., Danbury, CT (US). Pat. US 7071438 B2: B23K9/73.

FEATURES OF SYNERGISTIC EFFECT MANIFESTATION IN LASER-PLASMA WELDING OF SUS304 STEEL, USING DISC LASER RADIATION

V.Yu. Khaskin¹, V.M. Korzhyk^{1,2}, A.V. Bernatskii², O.M. Voitenko², Y.V. Ilyashenko², D. Cai¹

¹Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding). 363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe.

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

It is shown in the work that at laser-plasma welding of 3 mm stainless steel SUS304, using disc laser radiation, a stable manifestation of the synergistic effect and a ratio of powers of the laser and plasma components of 1:1 – 1:3 were found, that allows the penetration depth to be increased by approximately 25% without any change in the welding speed. The stability of the synergistic effect and increase of penetration depth are affected by the ratio of powers of the process components, method of feeding and composition of the shielding gas. In order to improve the hybrid welding effectiveness at coaxial feed of shielding and plasma gases, it is rational to use an additive of 2 – 3% oxygen to shielding gas argon. Stabilization of the synergistic effect due to selection of the mode parameters and shielding gas composition allows replacing up to 40% of the laser power by plasma power. The strength of joints of stainless steel SUS304, produced by hybrid laser-plasma welding, is equal to approximately 95% of that of the base metal. 8 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: laser-plasma welding, stainless steel, synergistic effect, process experiments, penetration depth, power ratio, shielding gas

Надійшла до редакції
05.02.2020

**Правила для авторів, ліцензійні угоди, архівні випуски журналів
на сайті видавництва www.patonpublishinghouse.com.
У 2020 р. у відкритому доступі випуски журналів з 2009 по 2018 рр. в форматі *.pdf.**