

ГІБРИДНЕ ЛАЗЕРНО-МІКРОПЛАЗМОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti–Al–V*

**І.В. Кривцун¹, В.Ю. Хаскін², В.М. Коржик^{1,2}, І.М. Клочков¹, В.В. Квасницький³,
О.А. Бабич^{1,2}, Cai Detao², Luo Ziyi², Han Shanguo²**

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Китайсько-український інститут зварювання ім. С.О. Патона, Гуанчжоу, КНР

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

Досліджено процес гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистового (до 3,0 мм) титанового сплаву Ti–Al–V марки TC4. Визначені рекомендовані технологічні параметри та умови лазерно-мікроплазмового зварювання в середовищі аргону, фізико-механічні властивості зварних з'єднань та встановлено наявність гібридного ефекту. Бібліогр. 5, табл. 3, рис. 7.

Ключові слова: лазерно-мікроплазмове зварювання, титановий сплав Ti–Al–V, погонна енергія, міцність, подовження, гібридний ефект

В сучасній промисловості все більше поширення набувають зварні вироби з тонколистових титанових сплавів. Такі вироби характеризуються високою міцністю під дією механічних навантажень, легкістю та високою корозійною стійкістю за умов експлуатації. Прикладами таких виробів можуть бути конструкції, що використовуються в авіакосмічній промисловості, галузі атомної енергетики, хімічній та харчовій промисловості, морській інженерії при експлуатації в умовах морського клімату або підвищеної вологості (наприклад, баки, фільтри) та інше. Широка низка таких конструкцій виготовляється з титанових сплавів товщиною до 3,0 мм із застосуванням стикових зварних з'єднань. Як правило, для вирішення таких завдань використовують контактне, аргонодугове або електронно-променеве зварювання [1].

Однак дані способи зварювання часто не в повній мірі задовольняють вимоги щодо економічності і технологічності виготовлення конструкцій, далеко не завжди дозволяють максимально наблизити фізико-механічні характеристики зварних з'єднань до властивостей основного металу. Високі вимоги щодо геометричної точності виробів з тонколистових титанових сплавів вимагають застосування заходів та технологій отримання з'єднань, які забезпечують мінімальний рівень залишкових зварювальних деформацій. Одним з кращих на сьогоднішній день способів зварювання з позицій мінімізації залишкових деформацій, отримання високоякісних і довговічних зварних з'єднань таких сплавів є електронно-променеве зварювання [2]. Але останнім часом цей метод намагаються замінити

лазерним зварюванням, як більш високопродуктивним і таким, що не потребує використання вакуумних камер [3]. Однак через порівняно високу вартість лазерного обладнання цей спосіб все ще не отримав досить значного поширення. Одним із шляхів зменшення вартості лазерного обладнання є зменшення потужності випромінювання за рахунок часткової його заміни в зварювальному процесі плазмово-дуговою складовою. Такий процес має назву гібридного лазерно-плазмового зварювання [4]. Застосування процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання при збереженні характеристик якості зварних з'єднань на рівні лазерного зварювання відкриває перспективу створення нової прогресивної зварювальної технології. Тому дана робота присвячена дослідженню можливостей гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистових титанових сплавів на прикладі досить поширеного сплаву системи легування Ti–Al–V з товщиною 1,0 та 3,0 мм та є актуальною.

Метою роботи є відпрацювання базових технологічних прийомів гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистового титанового сплаву Ti–Al–V марки TC4 (аналога VT6), вибір рекомендованих технологічних параметрів процесу та умов зварювання, а також визначення фізико-механічних характеристик отриманих з'єднань.

Технологічні дослідження процесу гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання зазначеного титанового сплаву проводили за допомогою установки, описаної в роботі [5], схема інтегрованого гібридного плазмотрона якої наведена на рис. 1. У ході експериментів застосовували дис-

* Публікується за матеріалами доповіді, представленого на міжнародній конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – POLYWELD 2019», 23–24 травня 2019 р., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

© І.В. Кривцун, В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, І.М. Клочков, В.В. Квасницький, О.А. Бабич, Cai Detao, Luo Ziyi, Han Shanguo, 2019

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) сплаву TC4 виробництва КНР (аналог BT6)

Ti	Fe	C	Si	V	N	Al	Zr	O	H	Домішки
86,45...90,9	≤0,6	≤0,1	≤0,1	3,5...5,3	≤0,05	5,3...6,8	≤0,3	≤0,2	≤0,015	Інших до 0,3

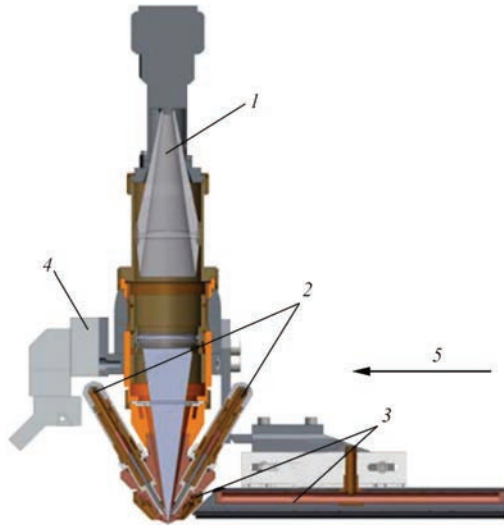


Рис. 1. Схема інтегрованого плазмотрона і проведення експериментів: 1 — подача лазерного випромінювання потужністю $P = 0,3 \dots 1,2$ кВт; 2 — катодні вузли; 3 — газовий захист; 4 — кріплення на руці робота; 5 — напрямок зварювання

ковий лазер з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,03$ мкм, потужність якого змінювали в межах $0,3 \dots 1,2$ кВт. Діаметр фокальної плями становив близько $0,4$ мм. В застосованому для досліджень інтегрованому коаксіальному плазмотроні прямої дії оригінальної розробки лазерне випромінювання поєднували зі стисненою малоамперною дугою потужністю до $2,3$ кВт [5]. В цьому плазмотроні сфокусоване лазерне випромінювання та стиснена дуга виводилися спільно через загальне 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

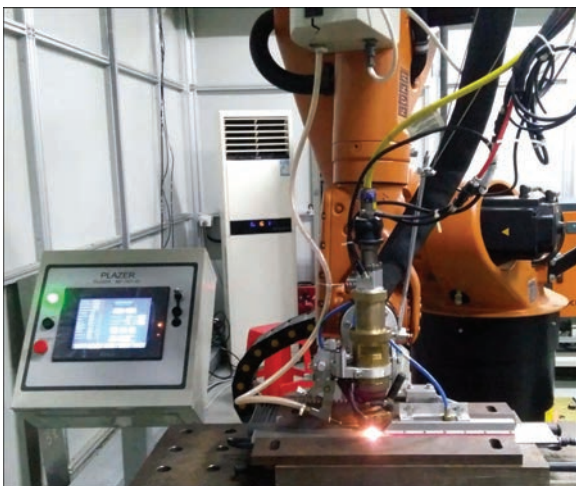


Рис. 2. Процес лазерно-мікроплазмового зварювання інтегрованим плазмотроном, закріпленим в руці робота KUKA KR30HA

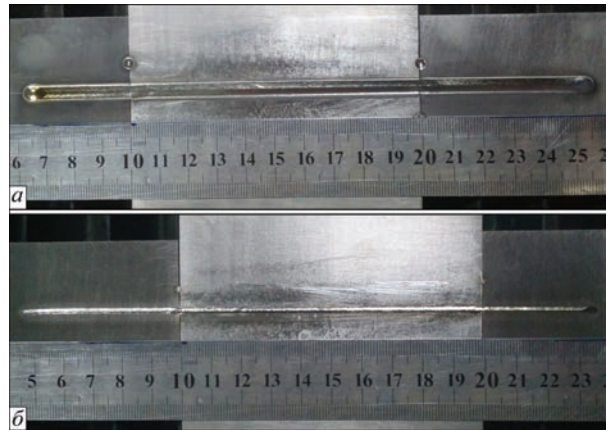


Рис. 3. Зовнішній вигляд пластин титанового сплаву TC4 ($\delta = 3,0$ мм), зварених встик без зазору між кромками лазерно-мікроплазмовим способом (потужність випромінювання $P = 1,0$ кВт, зварювальний струм $I = 50$ А, напруга $U = 26$ В, швидкість зварювання $v = 36$ м/год): лицьовий (а) і зворотний (б) боки

електричну дугу безперервної дії прямої полярності. Сила струму дуги інтегрованого мікроплазмотрона плавно регулювалася до 80 А при напрузі на дузі до 28 В. В якості зразків для зварювання встик і виконання проплавів використовували листи сплаву TC4 розміром $(200 \dots 300) \times 100 \times \delta$ мм, де $\delta = 1,0$ і $3,0$ мм (табл. 1). Переміщення інтегрованого плазмотрона щодо зварюваного зразка здійснювалось за допомогою антропоморфного робота KUKA KR30HA (рис. 2).

Проведені експерименти показали високу стабільність процесу лазерно-мікроплазмового зварювання. У разі гібридного зварювання встик листів титанового сплаву TC4 ($\delta = 1,0$ і $3,0$ мм) з зазором між зварюваними кромками до $0,1$ мм отримані позитивні результати (рис. 3, 4). При цьому гібридний процес перевищив за швидкістю лазерне зварювання на $30 \dots 40$ % і плазмове зварювання приблизно вдвічі (табл. 2).

В результаті проведення низки експериментів були визначені параметри режимів бездефектного (відсутність підрізів, непроварів і провисань шва) гі-

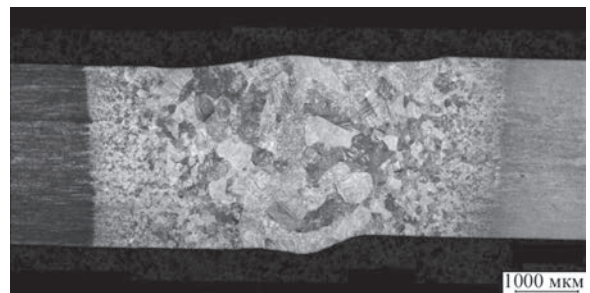


Рис. 4. Макроструктура стикового з'єднання титанового сплаву TC4 ($\delta = 3,0$ мм), отриманого лазерно-мікроплазмовим зварюванням в захисті аргонем

Таблиця 2. Режими і результати лазерного, плазмового і лазерно-мікроплазмового зварювання титанового сплаву ТС4 в захисті аргоном

Номер п/п	δ , мм	Потужність випромінювання, Вт	Зварювальний струм, А	Напруга на дузі, В	Швидкість зварювання, м/год	Погонна енергія, Дж/мм	Результат
1	1,0	600	40	24	60	80	Гібридне зварювання, провар, наявність підрізів
2	1,0	600	40	24	51	100	Гібридне зварювання, провар, добре формування шва, відсутність підрізів
3	1,0	600	-	-	30	70	Лазерне зварювання, провар, наявність підрізів
4	1,0	-	40	24	24	115	Мікроплазмове зварювання, провар
5	3,0	1200	50	26	42	190	Гібридне зварювання, провар, наявність підрізів
6	3,0	1000	50	26	36	200	Гібридне зварювання, провар, добре формування шва, відсутність підрізів
7	3,0	1000	-	-	24	150	Лазерне зварювання, провар, наявність підрізів
8	3,0	-	50	26	18	210	Мікроплазмове зварювання, провар

Таблиця 3. Режим і результат гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання бездефектного з'єднання титанового сплаву ТС4 ($\delta = 3,0$ мм)

Режим лазерно-мікроплазмового зварювання			
Потужність лазера P , Вт	1000	Швидкість зварювання v , м/год	36
Струм дуги I , А	50	Зазор від деталі до сопла, мм	3
Витрати плазموутворюючого газу (аргону) $Q_{пл.}$, л/хв	10	Витрати додаткового захисного газу (аргону) $Q_{дод.зах.}$, л/хв	20
Витрати захисного газу (аргону) $Q_{защ.}$, л/хв	10	Витрати газу (аргону) для захисту кореня шва $Q_{обр.}$, л/хв	20
Розміри отриманого зварного шва			
Ширина лицевого (верхнього) боку шва, мм	4,8	Ширина зворотного боку шва (кореня), мм	1,5
Опуклість лицевого боку, мм	0,1	Опуклість зворотного боку шва (кореня), мм	0,2

бридного зварювання встик листів титанового сплаву ТС4 із захистом зварювальної ванни і гарячої (понад 200 °С) частини шва аргоном (табл. 3). Згідно з цими параметрами були виконані зварні з'єднання зі сплаву ТС4 товщиною 1,0 і 3,0 мм, з яких потім були виготовлені зразки типу XIII (XIIIa) (ГОСТ 6996-66) для проведення механічних випробувань.

Для механічних випробувань основного металу і з'єднань зі сплаву ТС4 ($\delta = 1,0$ і 3,0 мм), зварених встик лазерно-мікроплазмовим способом із захистом аргоном, були вирізані три серії по 3 зразки. За допомогою розривної машини типу MTS Criterion 45 проводили випробування на статичний розтяг стикових швів для визначення межі міцності σ_b (МПа) і відносного подовження δ (%). Виміряні для кожної серії зразків результати усереднювали. За отриманими усередненими значеннями побудовані відповідні діаграми (рис. 5). За отриманими результатами було встановлено, що міцність з'єднань титанового сплаву ТС4, отриманих гібридним лазерно-мікроплазмовим зварюванням, становить близько 85...90 % міцності основного металу, відносне подовження зваре-

них таким способом зразків — не набагато більше 40 % від основного металу ($\delta \approx 4,5$ % для з'єднань при $\delta \approx 10$ % для основного металу). Для більшості зварювальних завдань наведені показники є задовільними.

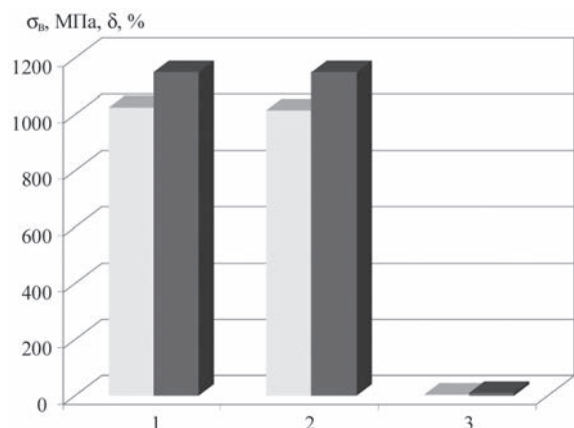


Рис. 5. Порівняльні результати механічних випробувань зварених лазерно-мікроплазмовим способом зразків з титанового сплаву ТС4 (світло-сірий колір) і основного металу (темно-сірий колір) при їх статичному розтягу: 1, 2 — усереднена межа міцності σ_b (МПа) для зразків товщиною 1,0 (1) та 3,0 (2) мм; 3 — відносне подовження δ (%) для всіх випадків

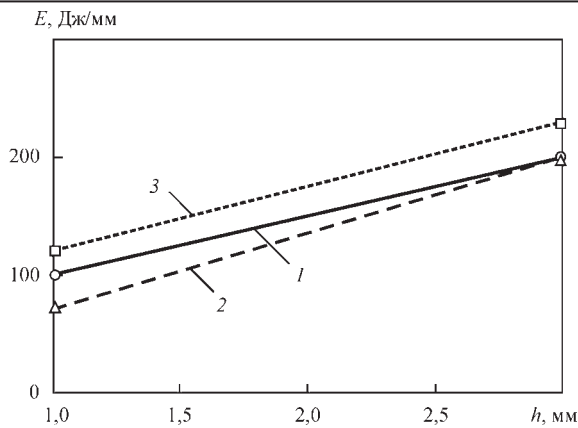


Рис. 6. Залежності погонної енергії E (Дж/мм) лазерно-мікроплазмового (1), лазерного (2) та плазмового (3) зварювання від товщини h (мм) зварюваних листів титанового сплаву ТС4

В ході аналізу проведених технологічних досліджень визначали погонну енергію процесу (E , Дж/мм) як суму потужностей лазерної (P , Вт) і мікроплазмової ($0,8IU$, Вт) складових, віднесена до швидкості зварювання (v , мм/с). За результатами розрахунків побудовані залежності зміни погонної енергії лазерно-мікроплазмового та лазерного зварювання при однакових швидкостях процесів (рис. 6). Порівняння кривих 1, 2 і 3 показало, що погонні енергії всіх розглянутих зварювальних процесів досить близькі. Можна відзначити, що у всіх випадках плазмовий процес має найбільше енерговкладення, при зварюванні листів товщиною 1,0 мм найменше енерговкладення забезпечує лазерний процес, а у разі зварювання листів товщиною 3,0 мм гібридний і лазерний процеси наближаються один до одного за вкладеною енергією.

Для порівняння результатів лазерного, мікроплазмового та гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання був проведений наступний експеримент. Лазерно-мікроплазмовим способом із захистом аргонном було отримано гарантоване проплавлення пластини зі сплаву ТС4 ($\delta = 3,0$ мм) на режимі: $P = 1000$ Вт, $I = 50$ А, $U = 26$ В, $v = 36$ м/год. Потім на тій самій швидкості з тими самими параметрами режиму були виконані два провари — лазерним і мікроплазмовим способами (рис. 7). При цьому сума погонних енергій складових процесів відповідала погонній енергії гібридного зварювання. Дослідження поперечних перерізів цих проварів показало, що глибина гібридного провару приблизно на 25...30 % перевершує суму глибин лазерного і мікроплазмового проварів. Це дозволило зробити висновок про наявність явно вираженого гібридного ефекту в разі лазерно-мікроплазмового зварювання розглянутим способом.

Висновки

1. В ході даної роботи досліджено гібридне лазерно-мікроплазмово зварювання тонколистового ти-

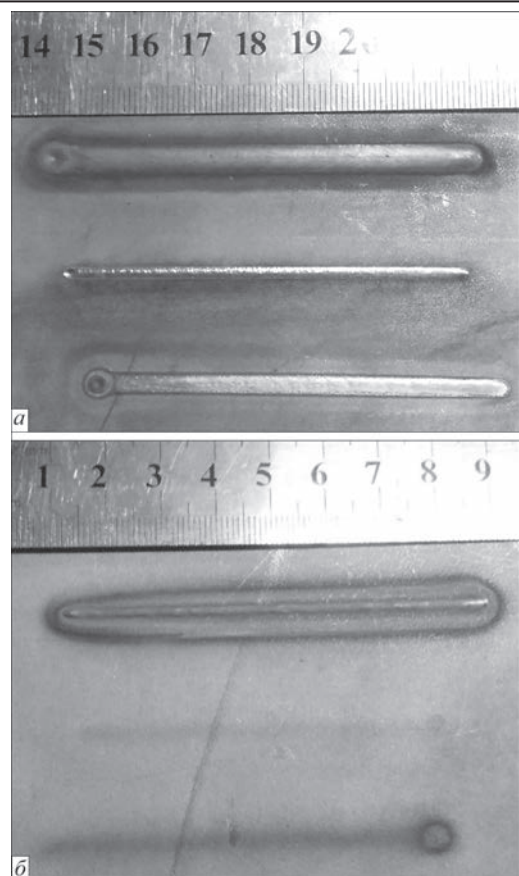


Рис. 7. Зовнішній вигляд лицьового (а) і зворотного (б) боків проварів в пластині зі сплаву ТС4 товщиною $\delta = 3,0$ мм (зверху вниз): гібридний, лазерний, мікроплазмовий

танового сплаву ТС4 із захистом аргонном. Визначено, що в разі стикування зварюваних кромок із зазором до 0,1 мм гібридне зварювання дозволяє отримувати якісні з'єднання без необхідності використання присаджувального дроту, без підрізів і провисань, характерних для лазерного зварювання. При цьому швидкість гібридного процесу перевищує швидкість лазерного на 30...40 %, а плазмового — приблизно вдвічі.

2. Аналіз результатів механічних випробувань зварних з'єднань титанового сплаву ТС4, отриманих гібридним лазерно-мікроплазмовим зварюванням, свідчить, що їх міцність на статичний розтяг становить близько 85...90 % від міцності основного металу, а відносно подовження — понад 40 %. Для більшості зварювальних завдань наведені показники є задовільними.

3. Зіставлення погонних енергій розглянутих зварювальних процесів показало достатню близькість їх величин. У всіх випадках плазмовий процес має найбільше енерговкладення. При зварюванні листів товщиною 1,0 мм найменше енерговкладення забезпечує лазерний процес, а у разі зварювання листів товщиною 3,0 мм гібридний і лазерний процеси порівнюються за вкладеною енергією.

4. Порівняльні дослідження проварів, виконаних на зразках зі сплаву ТС4 лазерним, мікроплазмовим і гібридним способами показали, що глибина провару при гібридному способі приблизно на 25...30 % перевершує суму глибин лазерного і мікроплазмового проварів. При цьому сума погонних енергій складових процесів відповідає погонній енергії гібридного зварювання. Це свідчить про наявність гібридного ефекту в разі застосування лазерно-мікроплазмового зварювання.

Примітка. Роботу виконано в межах проекту № 2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (Науково-дослідні розробки лазерних і плазмових технологій гібридного зварювання і різання)», Guangzhou, China, а також в межах спеціального проекту № 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 одержання зв'язаних з'єднань».

Список літератури

1. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. 2-е изд., доп. и перераб. Киев, Наукова думка.
2. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. (1988) *Лазерная техника и технология*. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов. Учеб. пособие для вузов. Григорьянц А.Г. (ред.). Москва, Высшая школа.
4. Кривцун И.В., Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. и др. (2007) Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 5, 49–53.
5. Кривцун И.В., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю. и др. (2017) Установка нового поколения для лазерно-микроплазменной сварки. *Сб. докл. Восьмой между. конф. «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»*. Кривцун И.В. (ред.). Киев, Международная Ассоциация «Сварка», 2017, сс. 95–100.

References

1. Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. 2nd Ed. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Nazarenko, O.K., Kajdalov, A.A., Kovbasenko, S.N. et al. (1987) *Electron beam welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N. (1988) *Laser technique and technology*. In: 7 books. Book 5: Laser welding of metals. In: Manual for higher education inst. Ed. by A.G. Grigoryants. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
4. Krivtsun, I.V., Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu. et al. (2007) Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, 5, 36-40.
5. Krivtsun, I.V., Korzhik, V.N., Khaskin, V.Yu. et al. (2017) Unit of new generation for laser-microplasma welding. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Processing of Materials*. Ed. by I.V. Krivtsun. Kiev, International Association Welding, 2017, 95-100.

ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-МИКРОПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА ТОНКОЛИСТОВОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА Тi–Al–V

И.В. Кривцун¹, В.Ю. Хаскин², В.Н. Коржик^{1,2}, И.Н. Клочков¹, В.В. Квасницкий³,
О.А. Бабич^{1,2}, Cai Detao², Luo Ziyi², Han Shanguo²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона, Гуанчжоу, КНР

³НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37

Исследован процесс гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистового (до 3,0 мм) титанового сплава Ti–Al–V марки ТС4. Определены рекомендованные технологические параметры и условия лазерно-микроплазменной сварки в среде аргона, физико-механические свойства сварных соединений и установлено наличие гибридного эффекта. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 7.

Ключевые слова: лазерно-микроплазменная сварка, титановый сплав Ti–Al–V, погонная энергия, прочность, удлинение, гибридный эффект

HYBRID LASER-MICROPLASMA WELDING OF TI-AL-V TITANIUM ALLOY

I.V. Krivtsun¹, V.Yu. Haskin², V.M. Korzhik^{1,2}, I.M. Klochkov¹, V.V. Kvasnytskyi³,
O.A. Babich^{1,2}, Cai Detao², Luo Ziyi², Han Shanguo²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²E.O. Paton Chinese-Ukrainian Welding Institute. Guangzhou, China

³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37, Pobedy Ave., Kiev-56, Ukraine

The process of hybrid laser-micro-plasma welding of thin-sheet Ti-Al-V titanium alloy of TS4 grade (up to 3.0 mm) was investigated. The recommended technological parameters and conditions of laser-plasma welding in argon medium, physical and mechanical properties of welded joints were determined, and the presence of hybrid effect was established. 5 Ref., 3 Tabl., 7 Fig.

Keywords: laser-microplasma welding, Ti-Al-V titanium alloy, input energy, strength, elongation, hybrid effect

Поступила в редакцию 01.07.2019