

ГІБРИДНЕ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВЕ ЗВАРЮВАННЯ: ЕФЕКТИВНІСТЬ І НОВІ МОЖЛИВОСТІ (Огляд)

В.М. Коржик¹, В.Ю. Хаскін¹, Є.В. Ілляшенко¹, С.І. Пелешенко³, А.А. Гринюк¹, О.А. Бабич²,
А.О. Альошин², О.М. Войтенко¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: khaskin1969@gmail.com

²ТОВ «Зовнішньоекономічне представництво Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона». 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

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

Розглянуто дослідницькі статті, присвячені розвитку лазерно-плазмових процесів в останні два десятиріччя. Встановлено, що сучасні напрямки наукових досліджень процесів лазерно-плазмового зварювання переважно спрямовані на вивчення особливостей спільної дії на сталі і сплави стисненої дугової плазми і лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1,03...1,07 мкм (в першу чергу – волоконного лазера), а також на вивчення фізичних основ прояву синергетичного (гібридного) ефекту при такій дії та визначення можливостей його практичного застосування. Зокрема визначено, що підвищення ефективності прояву синергетичного ефекту пов'язано з покращенням умов горіння плазмової дуги в зоні іонізованого факелу парів, що утворюється під дією сфокусованого лазерного випромінювання, а також спрощенням формування лазерного кейхолу за рахунок тиску плазмової дуги. Бібліогр. 49, рис. 9.

Ключові слова: лазерно-плазмове зварювання, синергетичний ефект, ефективність процесу, сталі, алюмінієві сплави, промислове застосування

Вступ. Запропоновані У. Стіном (W. M. Steen) [1] ідеї гібридного використання лазерного випромінювання і електричної дуги для зварювання та споріднених процесів отримали розвиток у теоретичних та практичних роботах таких провідних вчених, як У. Дилтей, К. Пауль, Ф. Ридель, І.В. Кривцун та ін. Сучасні процеси гібридного зварювання отримали певне промислове застосування. Наприклад, їх застосовують у автомобіле- і суднобудівництві, виробництві труб різних діаметрів тощо. На думку низки дослідників лазерно-плазмове зварювання є досить перспективним серед інших лазерно-дугових процесів. Тому автори пропонують огляд його сучасного стану для прогнозування подальшого розвитку.

Постановка проблеми. Авторами робіт [2–4] було проведено аналітичне моделювання процесів лазерно-плазмового зварювання і напилення зі використанням моделей інтегрованих коаксіальних головок. У цих роботах збільшення ефективності коаксіального лазерно-дугового розряду пояснювалося виникненням комбінованого лазерно-дугового розряду через поглинання стисненою дуговою плазмою променю CO₂-лазера, що проходить у центрі дугового стовпа. При цьому ступінь поглинання лазерного випромінювання плазмою дуги була вказана як ключовий параметр управління розрядом. Такий підхід переважно сформував

основи гібридного зварювання 20–30 років тому. В останні 10–20 років CO₂-лазери впевнено витіснили волоконні, випромінювання яких практично не взаємодіє з дуговою плазмою [5]. Це значною мірою змінило погляд на гібридний лазерно-плазмовий процес і перспективи його промислового застосування. Сучасні підходи до розробки зварювальних і споріднених лазерно-плазмових технологій базуються на застосуванні випромінювання із довжиною хвиль в діапазоні 1,03...1,07 мкм, тобто волоконних, дискових і Nd:YAG-лазерів.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – проаналізувати сучасний стан напрямків наукових досліджень і промислових застосувань процесів лазерно-плазмового зварювання та оцінити ефективність проявлення синергетичного (гібридного) ефекту при застосуванні лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1,03...1,07 мкм.

Для досягнення цієї мети вирішували наступні задачі:

– встановлення сучасних напрямків наукових досліджень процесів лазерно-плазмового зварювання;

– визначення ефективності проявлення синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталей і сплавів;

– аналіз впливу лазерно-плазмового процесу на характерні дефекти зварювання сталей і сплавів;

Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Ілляшенко Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>, Хаскін В.Ю. – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Пелешенко С.І. – <http://orcid.org/0000-0001-6828-2110>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Бабич О.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5633-5721>, Альошин А.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9696-6800>, Войтенко О.М. – <https://orcid.org/0000-0003-4946-6517>
© В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, Є.В. Ілляшенко, С.І. Пелешенко, А.А. Гринюк, О.А. Бабич, А.О. Альошин, О.М. Войтенко, 2023

– аналіз сучасного стану промислового застосування лазерно-плазмового зварювання.

Аналіз літературних джерел. Ще на початку ХХІ сторіччя акад. І.В. Кривцун стверджував, що основними факторами визначення характеру проплавлення металу при комбінованому лазерно-дуговому зварюванні є тепловий і динамічний вплив на поверхню зварювальної ванни використаних джерел тепла. Тому ним була розроблена система рівнянь для опису процесу випаровування металу під дією багатокомпонентної плазми, що утворюється над зварювальною ванною при лазерно-плазмовому зварюванні [6]. Така система складає основу для розрахунку характеристик теплового та динамічного впливу дугової, лазерної або комбінованої плазми на поверхню зварювальної ванни за відповідних способів зварювання в захисних газах. Наступним кроком він дослідив особливості проплавлення металу при лазерно-дуговому зварюванні з використанням Nd:YAG-лазера [7]. Розроблена для цього математична модель теплових процесів дозволила розраховувати профілі проплавлення при комбінованому впливі на виріб лазерного пучка та електричної дуги з урахуванням їхньої взаємодії на поверхні металу. Розрахунки показали наявність синергетичного (гібридного) ефекту, який міститься у неадитивному збільшенні об'єму металу, переплавленого лазерно-плазмовим способом, порівняно із об'ємами металу, окрема переплавленими лазерним і плазмовим способами.

З метою аналізу ефекту синергетичного сполучення, який виникає під час процесу, лазерно-плазмового зварювання можна розділити на три зони [8]: I – плазма над поверхнею, II – поверхня зварювальної ванни та III – виникнення взаємодії безпосередньо під поверхнею. Такі фактори, як спільне джерело зварювання, взаємне розташування лазерного і плазмового джерел, а також роль і вплив параметрів зварювання, здійснюють основний вплив на ступінь прояву синергетичного ефекту.

В роботі [9] показано, що характеристики дуги практично не змінюються у випадках взаємодії «газовий CO₂-лазер – гелієва дуга TIG» та «дисковий Yb:YAG-лазер – аргонна дуга TIG». Причина полягає в тому, що зворотні коефіцієнти поглинання гальмівного випромінювання сильно відрізняються через різну густину електронів аргонної та гелієвої дуг і різну довжину хвилі лазерів CO₂ та Yb:YAG. Таке дослідження певним чином сприяє частковому застосуванню досвіду використання CO₂-лазера в гібридних процесах із випромінюванням твердотільних лазерів.

У роботі [10] представлено результати дослідження синергетичного ефекту гібридного

лазерного-дугового зварювання. Експерименти проводилися з Nd:YAG-лазером потужністю $P_L = 500$ Вт у поєднанні зі стандартним обладнанням для TIG-зварювання. Досліджували два аспекти: ефективність теплопередачі та ефективність плавлення. Ефективність теплопередачі визначали за допомогою калориметричних вимірювань, а ефективність плавлення – за поперечними перерізами зварних швів, отриманих при різних режимах зварювання. Результати показують, що взаємодія лазера та дуги не призводить до помітної зміни ефективності теплопередачі, але призводить до значного збільшення ефективності плавлення. Неадитивне збільшення площини перетину швів, одержаних додаванням двох джерел тепла (лазера та дуги), свідчить про наявність синергетичного ефекту та гібридного характеру зварювання.

Спектральний аналіз гібридного плазмового факелу та високошвидкісний фотографічний аналіз процесу при гібридному зварюванні виявив наступне [11]. По-перше, принцип ефекту синергії полягає в тому, що при взаємодії зі стиснутою дугою неплавкого електроду лазер переводить енергію електронів на більш високий рівень і створює умови до квантового переходу. Завдяки цьому випромінюється більше фотонів, які посилюють надходження тепла до зварюваного матеріалу. Синергетичний ефект збільшується зі збільшенням потужності лазера та зменшується зі струмом дуги. Цей ефект пропорційний поперечному перерізу зварного шва, особливо його верхній частині. По-друге, кількість бризок при гібридному лазерно-дуговому зварюванні значно менша, ніж при дуговому.

У роботі [12] проведено низку досліджень лазерно-плазмового зварювання за схемою рис. 1. Запропоновано ефективність зварювання η_w визначати як відношення теоретичної величини потужності P_{FZ} , необхідної для розплавлення матеріалу зони плавлення (індекс FZ), до загальної поданої зварювальної потужності P_w відповідно до

$$\eta_w = \frac{P_{FZ}}{P_w} = \frac{\rho w_{ch} A_{FZ} \Delta h_{FZ}}{P_w}. \quad (1)$$

де ρ – масова щільність матеріалу, що зварюється; w_{ch} – швидкість руху; A_{FZ} – площа поперечного перерізу зони плавлення, а Δh_{FZ} – необхідне збільшення питомої ентальпії для плавлення. Співвідношення (1) можна розглядати як основу для визначення відносної ефективності зварювання, яка порівнює ефективність комбінованого лазерно-плазмового процесу з ефективністю окремих процесів.

Однією з причин підвищення ефективності лазерно-плазмового зварювання порівняно з окремими процесами може бути зміна напруги дуги при введенні лазерного випромінювання в плазмо-

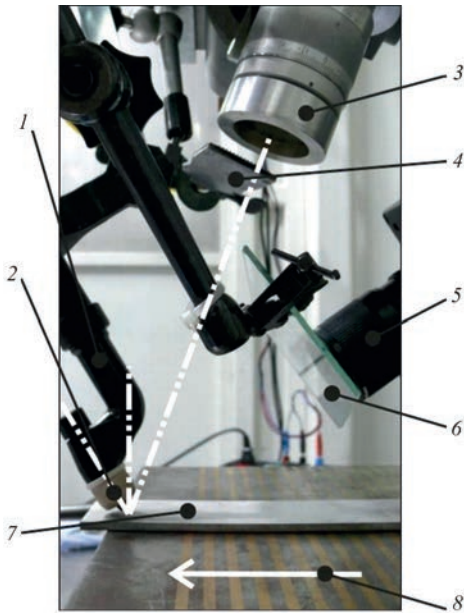


Рис.1. Експериментальна установка з роздільним розташуванням плазмотрона та лазерного променю [12]: 1 – плазмовий пальник, розташований під кутом $\alpha = 35^\circ$ (кутом назад); 2 – плазмове сопло (дистанція до зразка $L = 2$ мм); 3 – лазерний промінь, спрямований під кутом $\beta = 20^\circ$ (кутом вперед); 4 – кросс-джет (повітряний ніж); 5 – високошвидкісна камера; 6 – захисне скло; 7 – зразок; 8 – напрямок переміщення робочого стола (зразка)

во-дуговий процес. У разі зварювання алюмінію помітне падіння напруги дуги в діапазоні від -2 до -3 В при увімкненні лазерного променю. При зварюванні сталі за тих самих умов сильно сфокусованого лазерного променю було виявлено помірне збільшення напруги дуги між $0,15$ та $0,6$ В. Розрахунки показали [12], що ефективність лазерно-плазмового зварювання може змінюватися від $1,5$ (для алюмінієвого сплаву 6082) до $2,4$ (для сталі AISI304).

Якщо синергетичний ефект гібридної лазерно-дугової обробки пояснювати як збільшення передачі енергії від джерел тепла до матеріалу, термічна ефективність процесу η_T відповідає відношенню потужності P_U , яка необхідна для роз-

павлення зварного матеріалу за одиницю часу (без втрат) до загальної прикладеної потужності P_A [13]. Цю величину можна розділити відповідно до рівняння (2) на ефективність плавлення η_M (використання енергії всередині основного матеріалу) та ефективність сполучення енергії η_C (надходження енергії від джерел тепла) за допомогою потужності P_T , яка передається від джерел тепла до заготовки [13]:

$$\eta_T = \frac{P_U}{P_A} = \eta_M, \eta_C = \frac{P_U}{P_T} \frac{P_T}{P_A} \quad (2)$$

Метод і модель визначення ефективності були застосовані в роботі [14]. У той час як лазерний промінь потужністю $P_L = 200$ Вт і діаметром точки фокусування 200 мкм ледь розплавляє матеріал, процес плазмового зварювання з потужністю дуги близько 2 кВт досягає проплавлення зварного шва приблизно на $2/3$ товщини заготовки для застосованої сукупності параметрів (рис. 2). Поєднання обох процесів дає зварювання з повним проплавленням. У той час як ефективність сполучення енергії η_C підвищується лише на $\sim 10\%$ порівняно з арифметичною ефективністю сполучення енергії η_C окремих процесів, ефективність плавлення η_M комбінованого процесу приблизно у $1,5$ рази вища за ефективність плавлення η_M плазмово-дугового процесу. Можна зробити припущення, що тепловий потік у середині зварювальної ванни, керований кондуктивним і/або конвективним механізмами передачі, вигідно змінюється для створення результуючого поперечного перерізу зварного шва з підвищеним проникненням завдяки більш сприятливим термічним і/або гідродинамічним граничним умовам. Автори роботи [14] пропонують це вважати явним доказом гіпотези про те, що вторинні, тобто термічні, ефекти відповідають за синергічні переваги продуктивності лазерно-дугової обробки.

У роботі [15] визначено, що проявлення синергетичного ефекту залежить від швидкості зва-

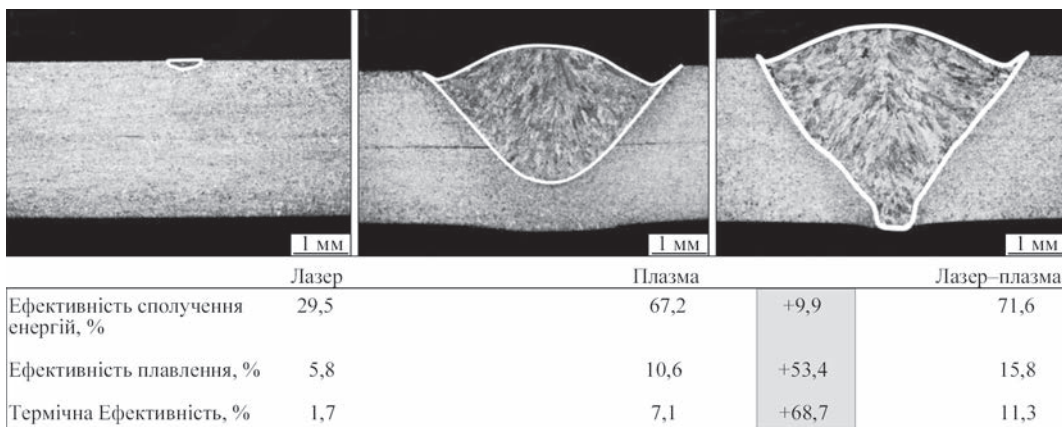


Рис. 2. Поперечні перерізи зварювання сталі AISI304 ($\delta = 1$ мм) лазерним променем ($P_L = 200$ Вт; $\omega_0 = 200$ мкм), плазмового зварювання ($Q_p = 1,8$ л/хв; $d_w = 5$ мм) і лазерно-плазмового зварювання (лазер-плазма) ($P_L = 200$ Вт; $\omega_0 = 200$ мкм; $Q_p = 1,8$ л/хв; $d_w = 5$ мм) з відповідними значеннями ефективності [14]

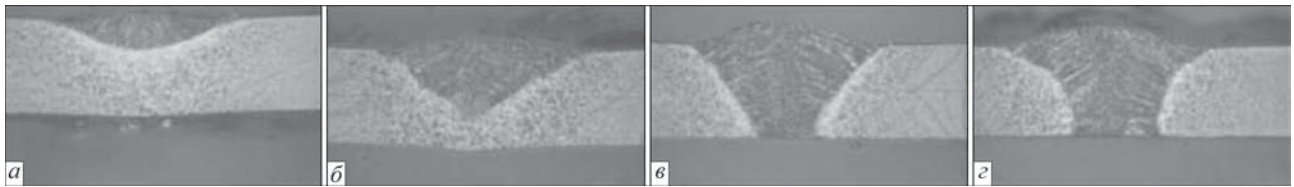


Рис. 3. Формування провару у листах сталі S235JR завтовшки 3 мм, зумовлене зміною потужності лазерного випромінювання $a - 0$ Вт; $b - 220$; $v - 330$; $z - 440$ (незмінні параметри: $I = 150$ А; $V = 1000$ мм/хв; $Q_p = 0,8$ л/хв, $L = 8$ мм, $\beta = 3^\circ$) [17]

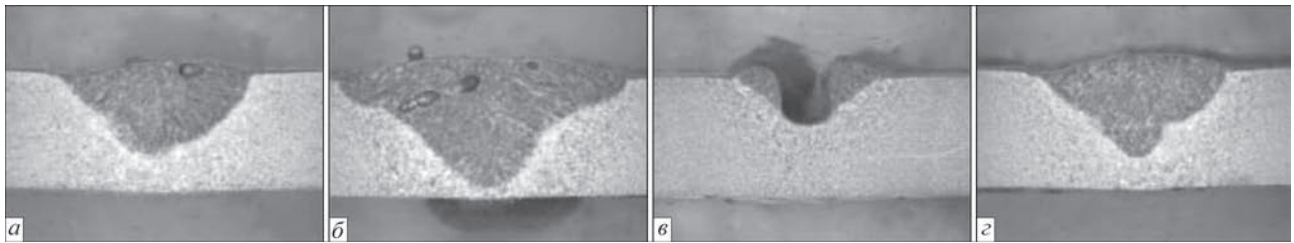


Рис. 4. Формування провару на листах сталі S235JR завтовшки 4 мм за рахунок зміни потужності лазерного випромінювання $a - 0$; $b - 440$; $v - 0$; $z - 440$ Вт і швидкість зварювання: $a, b - 200$; $v, z - 250$ мм/хв (незмінні параметри: $I = 150$ А; $Q_p = 0,4$ л/хв, $L = 8$ мм, $\beta = 19^\circ$) [17]

рювання. При швидкості 2 м/хв зварювання сталі AISI 304 ($\delta = 4$ мм) перевищення площі перетину гібридного провару дорівнює сумі площин, одержаних лазерним і плазмовим способами (по ~ 2 кВт), досягає 30 %, а для швидкості 4 м/хв – ~ 20 %. У роботі [16] для кількісної оцінки синергетичного ефекту при лазерно-дуговому гібридному зварюванні використовувався безрозмірний параметр приросту енергії плавлення ψ :

$$\psi = \frac{S_H - (S_L + S_A)}{S_L + S_A} \cdot 100\%,$$

де S_H, S_L, S_A – площі поперечного перетину швів гібридного, лазерного і дугового зварювання, відповідно.

Чим більше значення ψ , тим сильніший синергетичний ефект. Було розраховано, що при гібридному лазері TIG-зварюванні $\psi = 59,3 \dots 83,6$ %, а при лазері MIG – $\psi = 1 \dots 23$ %. Можна очікувати, що у разі використання в гібридному процесі стисненої електричної дуги синергетичний ефект буде ще більшим, ніж при лазері TIG-зварюванні [17]. Оцінити даний ефект для лазерно-плазмового зварювання із використанням Nd:YAG-лазера можна за шліфами поперечних перетинів, наведених на рис. 3 і 4, відповідно зазначених параметрів режимів.

Для реалізації процесів лазерно-плазмового зварювання сфокусований лазерний пучок може бути направлений в точку взаємодії з матеріалом під певним кутом, тобто за параксіальною схемою (рис. 1) (наприклад, [18]) або перпендикулярно до поверхні виробу, що зварюється, тобто за коаксіальною схемою (наприклад, [4, 19]). Неплавкий електрод зазвичай нахилений під певним (мінімально можливим) кутом до осі сфокусованого лазерного пучка [20]. Присаджувальний дріт може подаватися назустріч плазмовому струменю

або взагалі не подаватися. Також, в якості присаджувальних матеріалів можуть використовуватися порошки металів і сплавів [21, 22]. Вплив струму дуги переважно забезпечує формування верхнього валику, у той час, як потужність лазерного випромінювання забезпечує формування глибини проплавлення.

Для отримання найбільшого ефекту від спільного використання лазера та плазми фахівці з Інституту виробничих технологій спільно із фахівцями з Інституту технологій матеріалів і балок (Дрезден, Німеччина) розробили гібридну лазерно-плазмову голівку, розраховану на потужність випромінювання до 100 Вт та зварювальний струм до 40 А (рис. 5) [23–26]. У процесі дослідження зварювання нержавіючої сталі даним методом було виявлено [25], що активація лазерного променя викликає різке падіння напруги дуги приблизно на 1 В (рис. 6, а). Це явище спостерігалось лише у випадку низьких значень струму дуги. Для більш високої сили струму дуги цей ефект зникав (рис. 6, б).

У роботі [26] було виявлено, що за стабільних умов горіння дуги виміряне падіння напруги після



Рис. 5. Головка для лазерно-плазмового мікрозварювання та різання металів малих товщин (потужність випромінювання 100 Вт, зварювальний струм 40 А) [24]

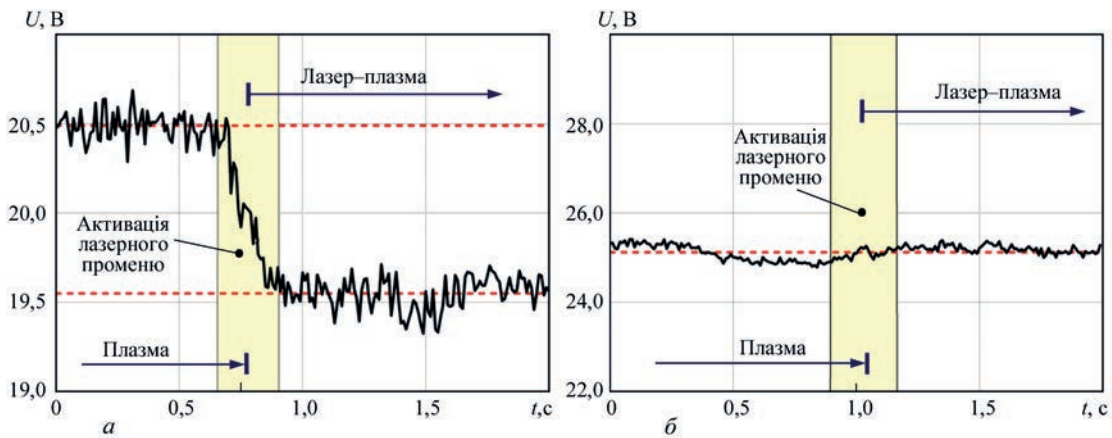


Рис. 6. Напряга дуги під час зварювання валиком на пластині нержавіючої сталі AISI 304 з підтримкою лазерного променя та без неї за різних умов зварювання: *a* – струм дуги $I = 40$ А, потужність лазера $P = 100$ Вт, швидкість зварювання $V = 0,75$ м/хв і товщина листа $\delta = 1$ мм; *б* – струм дуги $I = 160$ А, потужність лазера $P = 400$ Вт, швидкість зварювання $V = 2,00$ м/хв і товщина листа $\delta = 3$ мм [25]

ля активації лазерного променя (100 Вт) тісно пов'язане зі зміщенням зони дії дуги з положення позаду точки фокусування променя в точку, опромінену лазером. У випадку чистого плазмового процесу дуга відхиляється назад, анодна область явно відстає від осі стовпа дуги (рис. 7, *a*). У випадку варіанту з лазерним випромінюванням це відставання зменшується і анодна область дуги стабільно вкорінюється в зону фокусування променя (рис. 7, *б*). При цьому спостерігалось збільшення напруги на дузі на 0,4...0,6 В. Автори роботи [26] вважають, що основним механізмом стабілізації дуги має бути поверхневий ефект, який не пов'язаний зі змінами об'ємних властивостей дугової плазми ні через пряму взаємодію між лазерним випромінюванням і дуговою плазмою, ні через можливу зміну складу плазми в результаті лазерно-індукованого випаровування.

У роботі [27] запропоновано математичну модель, що показала перспективність лазерно-плазмового процесу з позицій особливостей впливу гібридних термоциклів на мікроструктуру матеріалу. Модель перевірена експериментами по лазерному зварюванню сталей кузова автомобіля. В роботі [28] описано лазерно-плазмові зварювання пластин низьковуглецевої сталі завтовшки 6 мм при потужності лазера до 5 кВт і струмі дуги до 150 А, яке забезпечило збільшення швидкості зварювання з повним проплавленням на 100 % або

збільшення глибини проплавлення на 25...100 % порівняно з використанням одного лазера. Також встановлено, що повне проплавлення при лазерно-плазмовому зварюванні призводить до значних втрат енергії через її вихід крізь корінь кейхолу. Всі переваги гібридного процесу проявляються лише тоді, коли корінь кейхолу закритий (в заготовці).

Чисельне дослідження температурного поля під час 3D-друку тонкостінних металевих деталей гібридним лазерно-плазмовим методом показує, що градієнт температури безпосередньо визначає швидкість росту зерен у зоні термічного впливу (ЗТВ) наплавленої стінки [29]. В роботі [30] проведено спостереження в реальному часі за параметрами пароголового каналу і зварювальної ванни при лазерному і лазерно-дуговому зварюванні. Автори робіт [31, 32] показали перспективність способу гібридного лазерно-плазмового зварювання для з'єднання тонколистових (до 3...4 мм) нержавіючих сталей аустенітного і феритного класів без застосування присаджувальних матеріалів.

У роботі [33] визначено, що при лазерно-мікроплазмовому зварюванні сплаву 7075 ($\delta = 1,5$ мм) об'ємна частка дефектів переплавленого металу у вигляді пор розміром 15...25 мкм порівняно зі мікроплазмовим зварюванням знижується до рівня, характерного для лазерного зварювання (~5 %). Твердість переплавленого мета-

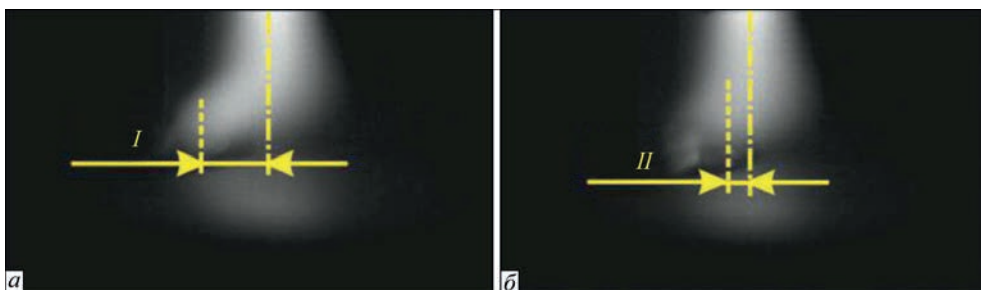


Рис. 7. Форма дуги до (*a*) і після (*б*) активації променя: $I = 40$ А; $P = 100$ Вт; $V = 1$ м/хв; матеріал – нержавіюча сталь AISI 304 ($\delta = 1$ мм) [26]

лу знижується на 15...20 % при твердості металу ЗТВ близької до основного металу. Для порівняння – при лазерному способі зниження твердості переплавленого металу ~15 %, при мікроплазмовому ~30 % (відносно основного металу). Отримані данні підтверджують перевагу лазерно-мікроплазмового способу, доведена в роботі [34]. Цей спосіб зменшує використання лазерної енергії до 40...50 %, час існування зварювальної ванни (0,03...0,05 с) наближується до лазерного зварювання, усувається небезпека вигорання легуючих елементів.

Окрім процесів зварювання лазерно-плазмовий спосіб обробки матеріалів може застосовуватися для термічного модифікування поверхонь, зокрема, легування. Так, у роботі [35] показано, що режими лазерно-плазмового легування сприяють збільшенню характеристик міцності (в середньому на 20 %) у порівнянні з легуванням лазерним випромінюванням. У роботі [36] на прикладі лазерно-плазмового зміцнення розглянуто вплив концентрованих потоків енергії на матеріали і встановлено можливість утворення наноструктурованих шарів. На робочі поверхні деталей можна наносити надтонкі покриття за рахунок оптичного пульсуючого розряду, що створюється лазерно-плазмовим способом [37]. У роботі [38] показано, що при дії джерела лазерного нагрівання на поверхню пластини в розплавленій зоні формується інтенсивний (~50 см/с) приповерхневий перебіг розплаву, обумовлений домінуючою дією термокапілярної сили, яка виникає за рахунок високого градієнта температури (~7000 °C/см) на вільній поверхні металевої ванни. Ця течія, спрямована від осьової частини ванни у бік фронту плавлення, інтенсифікує перенесення енергії з перегрітої при осьовій частині ванни в її периферійну область та сприяє збільшенню ширини проплавленої зони. Вплив конвективного перемішування ванни на глибину проплавлення істотно менший через переважно приповерхневу течію розплаву.

Обговорення результатів аналізу літературних джерел. При зварюванні висококонцентрованими джерелами нагріву сталей і сплавів можуть виникати такі характерні дефекти, як гарячі тріщини, внутрішні пори, розміщення навколошовної зони, провисання швів, підрізи та нерегулярний характер формування валика підсилення [15, 33, 39]. Одним з прогресивних способів усунення зазначених дефектів є застосування гібридних лазерно-дугових і лазерно-плазмових способів зварювання [39]. Так, при лазерно-плазмовому зварюванні глибину проплавлення й формування кореневого валику переважно забезпечує лазерна складова, а усунення підрізів і формування верх-

нього валику підсилення забезпечує плазмова складова [15].

Одним з важливіших аспектів лазерного зварювання з глибоким проплавленням є формування й утримання лазерного парогазового каналу – так званого кейхолу [40]. Вплив плазмової складової при лазерно-плазмовому зварюванні можна оцінити за рис. 4, в. На цьому рисунку видно, що навіть при відсутності лазерного випромінювання дугова плазма за рахунок власного тиску на рідкий метал зварювальної ванни створює певний прогин, який являє собою певний зачаток кейхолу [17]. Очевидно, що у разі потрапляння лазерного випромінювання до даного прогину рідкого металу умови для формування кейхолу значно покращуються. Можна припустити, що утворення синергетичного (гібридного) ефекту в разі використання лазерного випромінювання з $\lambda = 1,03...1,07$ мкм відбувається як за рахунок покращення поглинання лазерного випромінювання рідким металом, розплавленим плазмовим джерелом, так і за рахунок утворення прогину металу зварювальної ванни плазмовим джерелом.

Згідно описаних у роботі [26] результатів швидкісної відеозйомки (рис. 8), після активації сфокусованого лазерного випромінювання плазмова дуга скорочується через наближення до зони лазерного факелу іонізованого випаровування металу (тобто більш електропровідної зони). Це сприяє скороченню плазмової дуги і описаному в роботі [26] падінню напруги на дузі. У разі заглиблення плазмової дуги у лазерний кейхол може відбуватися її подовження, що призводитиме до певного збільшення напруги на дузі.

У разі застосування лазерно-плазмового порошкового гібридного зварювання усуваються втрати енергії на тепловідведення у присаджувальний матеріал [22]. Це посприяло впровадженню такої технології у суднобудівництві [41]. Лазерно-плазмове зварювання без застосування присаджувальних матеріалів активно використовується у виробництві автомобільної техніки [42]. Його застосовують для виготовлення заздалегідь зварених заготовок (tailor welded blanks), зварювання внапусток сталі з цинковим покриттям (зі зазором), зварювання з використанням додаткового матеріалу. Прикладом промислового застосування лазерно-плазмового зварювання без застосування присаджувального матеріалу є зварювання нержавіючих труб малого діаметра [43].

Майбутнє лазерно-плазмового зварювання як незалежного процесу пов'язано із створенням інтегрованої головки, яка поєднує два джерела енергії за коаксіальною схемою [42]. Одним з прикладів такої інтегрованої зварювальної головки є показана на рис. 8, а коаксіальна голов-

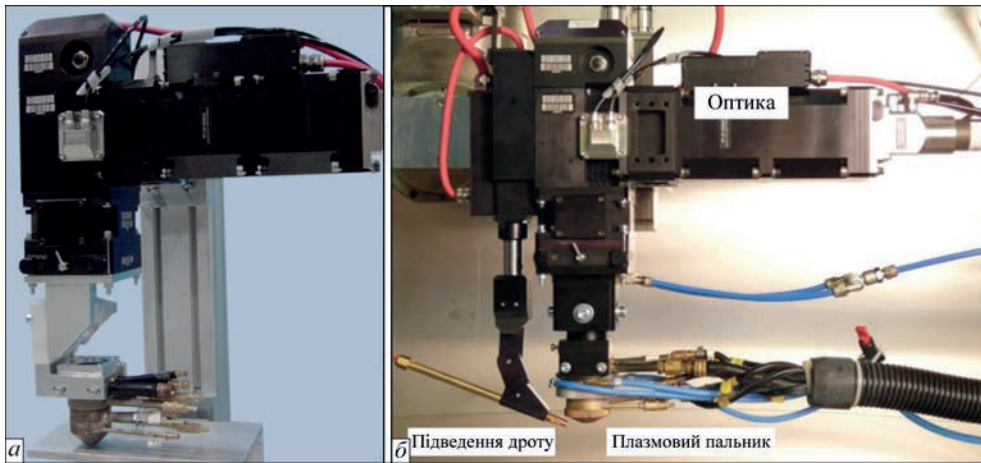


Рис. 8. Інтегрована головка для лазерно-плазмового зварювання: без (а) [44] і з (б) [45] подачею присаджувального дроту

ка, розроблена у Бременському інституті прикладних променевих технологій (Німеччина) [44]. Дана головка згодом була модернізована і оснащена системою подачі присаджувального дроту (рис. 8, б) [45]. Іншим прикладом є розроблена в Інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є.О. Патона НАН України коаксіальна головка для лазерно-плазмового зварювання (рис. 9) [46].

Проведений аналіз літературних даних дозволяє сформулювати наступні основні переваги гібридного лазерно-плазмового процесу в порівнянні з лазерним:

- спільне використання енергії лазера та плазми дозволяє зменшити лазерну потужність та знизити вартість обладнання (оціночно до 40...50 %);
- плазмова складова лазерно-плазмового зварювання дозволяє знизити вимоги до підготовки та складання зварюваних крайок і здійснювати очищення від окисної плівки (для алюмінієвих сплавів);
- підвищення продуктивності за рахунок збільшення швидкості зварювання;

– зменшення енергоємності за рахунок підвищення ефективності процесу;

– розширення наплавленого валику при лазерно-плазмовому наплавленні і збільшення глибини проплавлення при зварюванні за рахунок зміни гідродинамічних течій у зварювальній ванні.

Подальші перспективи розвитку лазерно-плазмового зварювання і споріднених процесів пов'язані зі використанням волоконних лазерів ($\lambda = 1,07$ мкм), як найбільш доступних для широкого загалу користувачів [47]. Характеристики плазмової складової пов'язані зі зварюваним металом (пряма полярність для сталей і різнополярний асиметричний струм для алюмінієвих сплавів) [48]. Порівняно зі лазерним зварюванням лазерно-плазмове сприяє зниженню вимог до підготовки крайок, а порівняно зі плазмовим – знижує залишкові деформації [49]. Враховуючи підвищення продуктивності, можна очікувати на тенденції заміни в промисловості окремих процесів лазерного і плазмового зварювання ла-

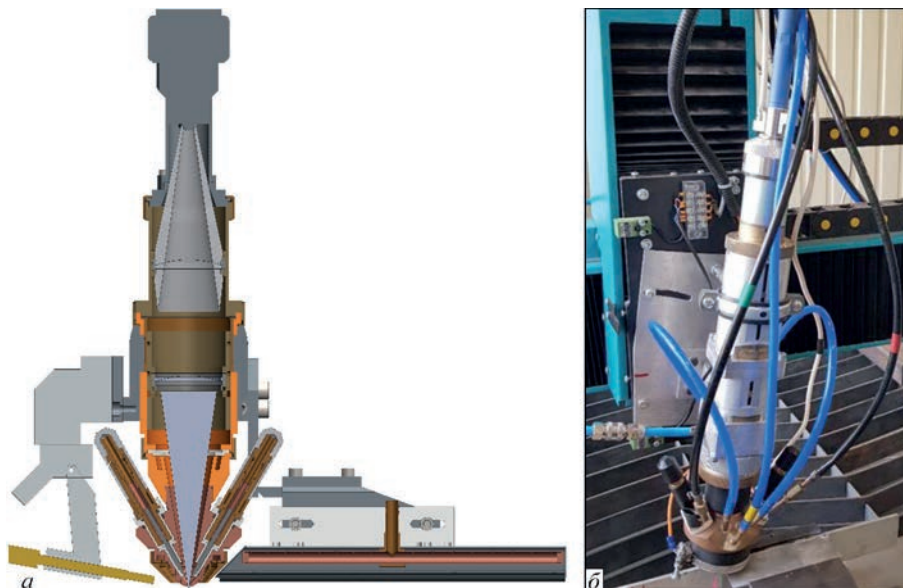


Рис. 9. 3D-модель (а) та зовнішній вигляд (б) головки для лазерного та лазерно-плазмового зварювання, розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [46]

зерно-плазмовим. Завдяки забезпеченню значних швидкостей (до 10 м/хв і більше) лазерно-плазмовому зварюванню може застосовуватися для серійного виробництва таких тонкостінних виробів і конструкцій зі сталей і сплавів, як звичайні та профільні труби, кузовні елементи автомобільного і залізничного транспорту, вироби для харчової та хімічної промисловості тощо.

Можна припустити, що подальше наукове дослідження лазерно-плазмового зварювання доцільно переважно акцентувати на взаємному впливі випромінювання волоконного лазера і стиснутої дуги на сталі та сплави. Перспективою цього є виявлення особливостей, переваг і недоліків такого процесу з метою встановлення меж виникнення синергетичного ефекту, можливостей підсилення його дії та шляхів подальшого застосування.

Висновки

1. Сучасні напрямки наукових досліджень процесів лазерно-плазмового зварювання переважно спрямовані на вивчення особливостей спільної дії на сталі та сплави стисненої дугової плазми і лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1,03...1,07 мкм (в першу чергу – волоконного лазера), а також на вивчення фізичних основ прояву синергетичного (гібридного) ефекту при такій дії та визначення можливостей його практичного застосування. Наприклад, визначено, що сприяння прояву синергетичного ефекту пов'язано з покращенням умов горіння плазмової дуги в зоні іонізованого факелу парів, що утворюється під дією сфокусованого лазерного випромінювання, а також спрощенням формування лазерного кейхолу за рахунок тиску плазмової дуги.

2. Ефективність проявлення синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталей і сплавів запропоновано визначати як відношення теоретичної величини потужності, необхідної для розплавлення матеріалу шва, до загальної поданої зварювальної потужності; або як відношення площі поперечного перерізу шву лазерно-плазмового процесу до суми площ поперечних перерізів швів, окремо виконаних плазмовим та лазерним зварюванням. Встановлено, що ефективність лазерно-плазмового зварювання може змінюватися від 1,5 до 2,4.

3. За рахунок застосування лазерно-плазмового зварювання можливо усунути такі характерні для лазерного і плазмового зварювання високоміцних сталей і сплавів дефекти, як гарячі тріщини, внутрішні пори, розміщення колошовної зони, провисання швів, підрізи та нерегулярний характер формування валика підсилення.

4. Промислове застосування швидкісного лазерно-плазмового зварювання пов'язано із змен-

шенням лазерної енергії (до ~50 % порівняно із лазерним зварюванням), зниженням вимог до підготовки і складання зварюваних крайок, підвищенням швидкості зварювання, мінімізацією погонної енергії процесу. Дана технологія має значну перспективу індустріалізації в крупносерійних виробництвах тонкостінних виробів і конструкцій (в першу чергу із нержавіючих сталей, титанових і алюмінієвих сплавів), таких, як конструкції зі звичайних та профільних труб, кузовні елементи залізничного транспорту, довгомірні зварні панелі авіаційного і морського транспорту, відповідальні конструкції обладнання харчової та хімічної промисловості тощо.

Список літератури/References

1. Steen, W.M., Eboo, M. (1979) Arc augmented laser welding. *Metal Construction*, 11(7), 332–335.
2. Gvozdetsky, V. S., Krivtsun, I. V., Chizhenko, M. I. et al. (1995) *Laser-arc discharge: Theory and application. Welding and Surfacing Rev.* 3, Harwood.
3. Кривцун І.В., Чиженко М.І. (1997) Основы расчета лазерно-дуговых плазматронов. *Автомат. сварка*, 1, 16–23.
Krivtsun, I.V., Chizhenko, M.I. (1997) Principles of calculation of laser-arc plasmatrons. *Avtomatich. Svarka*, 1, 16–23 [in Russian].
4. Dykhno, I.S., Krivtsun, I.V., Ignatchenko, G.N. (1997) *Combined Laser and Plasma Arc Welding Torch*. Patent US5700989.
5. Quintino, L., Costa, A., Miranda, R. et al. (2007) Welding with high power fiber lasers – A preliminary study. *Materials & Design*, 28(4), 1231–1237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.009>
6. Кривцун І.В. (2001) Модель испарения металла при дуговой, лазерной и лазерно-дуговой сварке. *Автомат. сварка*, 3, 3–10.
Krivtsun, I.V. (2001) Model of evaporation of metal in arc, laser and laser-arc welding. *The Paton Welding J.*, 3, 2–9.
7. Кривцун І.В. (2001) Особенности проплавления металла при лазерно-дуговой сварке с использованием ИАГ-лазера. *Автомат. сварка*, 12, 33–36.
Krivtsun, I.V. (2001) Peculiarities of penetration of metal in laser-arc welding using YAG-laser. *The Paton Welding J.*, 12, 29–32.
8. Zhiyong, L., Srivatsan, T.S., Yan, L. et al. (2013) Coupling of Laser with Plasma Arc to Facilitate Hybrid Welding of Metallic Materials: A Review. *J. of Materials Engineering and Performance*, 22(2), 384–395. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0280-6>
9. Shikai, Wu, Rongshi, Xiao. (2015) Effect of high power CO₂ and Yb:YAG laser radiation on the characteristics of TIG arc in atmospherical pressure argon and helium. *Optics & Laser Technology*, 67, 169–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.10.018>
10. Hu, B., den Ouden, G. (2005) Synergetic effects of hybrid laser/arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(4), 427–431. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329305X44170>
11. Zhang, C., Gao, M., Zeng, X. (2019) Influences of synergy effect between laser and arc on laser-arc hybrid welding of aluminum alloys. *Optics & Laser Technology*, 120, 105766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105766>
12. Mahrle, A., Schnick, M., Rose, S. et al. (2011) Process characteristics of fibre-laser assisted plasma arc welding. *Phys. D: Appl. Phys.* 44, 345502. DOI: 10.1088/0022-3727/44/34/345502
13. Hipp, D., Mahrle, A., Jäckel, S. et al. (2018) Füssel U. Method for high accuracy measurements of energy coupling and melting efficiency under welding conditions. *J. of Laser Applications*, 30, 032414. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5040615>

14. Hipp, D., Mahrle, A., Beyer, E. et al. (2019) Thermal Efficiency Analysis for Laser-Assisted Plasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel. *Materials*, **12**, 1460. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091460>
15. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А. та ін. (2021) Особливості лазерноплазмового зварювання корозійностійкої сталі AISI 304 з використанням лазера. *Автомат. зварювання*, **12**, 18–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.12.02>
Korzhyk, V.M., Khaskin, V.Yu., Grynyuk, A.A. et al. (2021) Features of laser-plasma welding of corrosion-resistant steel AISI 304 with laser application. *The Paton Welding J.*, **12**, 9-17. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.12.02>
16. Meng, Y., Gao, M., Zeng, X. (2018) Effects of arc types on the laser-arc synergic effects of hybrid welding. *Optics Express*, **26**(11), 14775–14785. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.26.014775>
17. Emmelmann, C., Kirchhoff, M., Petri, N. (2011) Development of Plasma-Laser-Hybrid Welding Process. *Physics Procedia*, **12**, 194–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.025>
18. Walduck, R.P. (1999) *Enhanced Laser Beam Welding*. Patent US5866870.
19. Dykhno, I., Ignatchenko, G., Bogachenkov, E. (2002) *Combined Laser and Plasma-Arc Processing Torch and Method*. Patent US6388227.
20. Kim, C.H., Ahn, Y.H., Kim, J.H. (2011) CO₂ Laser-Micro Plasma Arc Hybrid Welding for Galvanized Steel Sheets. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**(1), 47–53. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61059-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61059-5)
21. Stelling, K., Lammers, M., Schobbert, H. et al. (2006) Qualification of Nd:YAG and CO₂ Laser Plasma Hybrid Welding with Filler Material Powder. *Welding and Cutting*, **5**(6), 330–334.
22. Stelling, K., Schobbert, H., Kannengiesser, Th. et al. (2005) Vertical-up and -down laser plasma powder hybrid welding of a high nitrogen austenitic stainless steel. *Welding in the World*, **49**(5/6), 45–49.
23. Rose, S., Mahrle, A., Schnick, M. et al. (2013) Plasma welding with a superimposed coaxial fiber laser beam. *Welding in the World*, **57**(6), 857–865. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0079-6>
24. Beyer, E., Standfuss, J. (2012) Innovations in laser welding using high brightness lasers. *Heriot-Watt IMRC Conference, 26th June 2012, Edinburgh*.
25. Mahrle, A., Rose, S., Schnick, M. et al. (2013) Laser-assisted plasma arc welding of stainless steel. *J. of Laser Applications*, **25**, 032006. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4798338>
26. Mahrle, A., Rose, S., Schnick, M. et al. (2013) Stabilisation of plasma welding arcs by low power laser beams. *Science and Technology of Welding and Joining*, **18**(4), 323–328. DOI: <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000109>
27. Turichin, G., Lopota, V., Valdaitseva, E. et al. (2007) Peculiarity of phase transformation kinetics and control of material microstructure formation during laser hybrid welding. In: *Laser Technologies in Welding and Materials Processing*. Kiev: E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU, 126–130.
28. Swanson, P.T., Page, C.J., Read, E. et al. (2007) Plasma augmented laser welding of 6 mm steel plate. *Science and Technology of Welding and Joining*, **12**(2), 153–160. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329307X164283>
29. Fanrong Kong, Haiou Zhang, Guilan Wang. (2009) Modeling of Thermal-metallurgical Behavior during Hybrid Plasma-laser Deposition Manufacturing. *Progress in Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China, March 23–27*, 946–953.
30. Туричин Г.А., Цибульский И.А., Земляков Е.В. и др. (2009) О системе мониторинга лазерно-дуговой сварки. *Металлообработка*, **6**, 46–48.
Turichin, G.A., Tsybulsky, I.A., Zemlyakov, E.V. et al. (2009) On monitoring system of laser-arc welding. *Metallroobrabotka*, **6**, 46–48 [in Russian].
31. Сидорец В.Н., Бушма А.И., Хаскин В.Ю. (2012) Перспективы применения гибридной лазерно-плазменной сварки нержавеющей сталей в машиностроении. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, **3**(28), 244–246.
Sidorets, V.N., Bushma, A.I., Khaskin, V.Yu. (2012) Prospectives of application of hybrid laser-plasma welding of stainless steels in machine-building. *Vіsnyk DDMA*, **3**(28), 244–246 [in Russian].
32. Кривцун И.В., Бушма А.И., Хаскин В.Ю. (2013) Гибридная лазерно-плазменная сварка нержавеющей сталей. *Автомат. зварювання*, **3**, 48–52.
Krivtsun, I.V., Bushma, A.I., Khaskin, V.Yu. (2013) Hybrid laser-plasma welding of stainless steels. *The Paton Welding J.*, **3**, 48–50.
33. Korzhyk, V., Khaskin, V., Grynyuk, A. (2022) Comparison of the features of the formation of joints of aluminum alloy 7075 (Al–Zn–Mg–Cu) by laser, microplasma, and laser-microplasma welding. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **1**(12)(115), 38–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253378>
34. Кривцун И.В., Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. (2007) Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов. *Автомат. сварка*, **5**, 49–53.
Krivtsun, I.V., Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu. (2007) Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **5**, 36–40.
35. Маркашова Л.И., Шелягин В.Д., Кушнарєва О.С. и др. (2015) Влияние технологических параметров лазерного и лазерно-плазменного легирования на свойства наплавленных слоев стали 38ХН3МФА. *Автомат. сварка*, **5-6**, 131–137.
Markashova, L.I., Shelyagin, V.D., Kushnaryova, O.S. et al. (2015) Effect of technological parameters of laser and laser-plasma alloying on properties of 38KhN3MFA steel layers. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 124–129.
36. Репкин Д.А., Мелюков В.В., Гукасов А.К. и др. (2013) Определение режима воздействия концентрированными потоками энергии на материалы методом обратной задачи. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, **2**(2), 88–91.
Repkin, D.A., Melyukov, V.V., Gusakov, A.K. et al. (2013) Determination of action mode by concentrated energy flows on material using inverse problem method. *Vestnik Nizhegorodskogo Un-ta*, **2**(2), 88–91 [in Russian].
37. Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л. и др. (2014) Применение метода лазерно-плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двигателей внутреннего сгорания. *Обработка металлов*, **1**(62), 14–22.
Vagaev, S.N., Grachev, G.N., Smirnov, A.L. et al. (2014) Application of laser-plasma method of surface modification of metals for improving of tribotechnical characteristics of internal combustion engine cylinders. *Obrabotka Metallov*, **1**(62), 14–22 [in Russian].
38. Борисов Ю.С., Демченко В.Ф., Лесной А.Б. и др. (2013) Численное моделирование теплообмена и гидродинамики при лазерно-плазменной обработке металлических материалов. *Автомат. сварка*, **4**, 3–8.
Borisov, Yu.S., Demchenko, V.F., Lesnoj, A.B. et al. (2013) Numerical modeling of heat transfer and hydrodynamics in laser-plasma treatment of metallic materials. *The Paton Welding J.*, **4**, 2-7.
39. Пелешенко С.І., Хаскін В.Ю., Коржик В.М. та ін. (2022) Особливості зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання міцних сплавів на основі алюмінію і берилію (Огляд). *Автомат. зварювання*, **12**, 9–19. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.12.02>
Peleshenko, S.I., Khaskin, V.Yu., Korzhyk, V.M. et al. (2022) Features of welding high-strength alloys based on aluminium and beryllium using highly-concentrated heat sources (Review). *The Paton Welding J.*, **12**, 9–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.12.02>
40. Svenungsson, J., Choquet, I., Kaplan, A. (2015) Laser Welding Process – A Review of Keyhole Welding Modelling. *Physics Procedia*, **78**, 182–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.042>

41. Шишов А.Ю., Третяков Р.С., Третяков Е.С. (2012) Перспективы разработки технологии лазерно-плазменной сварки изделий больших толщин в судостроении с использованием порошкового присадочного материала. *Инженерный журнал: наука и инновации*, **6**, 146–152. <https://rucont.ru/efd/274958>
42. Page, C. J., Devermann, T., Biffin, J. et. al. (2002) Plasma augmented laser welding and its applications. *Science and Technology of Welding and Joining*. **7**(1), 10–15. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217102225001313>
43. Yoon, S.H., Hwang, J.R., Na, S.J. (2007) A study on the plasma-augmented laser welding for small-diameter STS tubes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **32**, 1134–1143. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0436-3>
44. Lasertechnik aktuell (2007) *Bremer Institut für angewandte Strahltechnik Bulletin*, **2**.
45. Möller, F. (2016) *Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl bei Aluminium*. *Strahltechnik*, Bd. 59, Bremen: BIAS Verlag.
46. Peleshenko, S., Kvasnytskyi, V., Khaskin, V. et. al. (2022) Features of physical and metallurgical processes during welding of thin-walled aluminum alloy structures using laser radiation. *Danish Scientific J.*, **65**, 50–59. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7271299>
47. Bernatskyi, A., Khaskin, V. (2021) The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries. *History of Science and Technology*. **11**(1), 125–149. DOI: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2021-11-1-125-149>
48. Шелягин В.Д., Кривцун И.В., Борисов Ю.С. и др. (2005) Лазерно-дуговые и лазерно-плазменные технологии сварки и нанесения покрытий. *Автомат. сварка*, **8**, 49–54.
49. Shelyagin, V.D., Krivtsun, I.V., Borisov, Yu.S. (2005) Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies. *The Paton Welding J.*, **8**, 44–49.
49. Korzhyk, V., Bushma, O., Khaskin, et. al. (2017) Analysis of the Current State of the Processes of Hybrid Laser-Plasma Welding. In: Proceedings of the Second International Conference on Mechanics, Materials and Structural Engineering (ICMMSE 2017). *Advances in Engineering Research (AER)*, **102**, 80–90. DOI: <https://doi.org/10.2991/icmmse-17.2017.14>

HYBRID LASER-PLASMA WELDING:
EFFICIENCY AND NEW POSIBILITIES (Review)

V.M. Korzhyk¹, V.Yu. Khaskin¹, E.V. Ilyashenko¹, S.I. Peleshenko³, A.A. Grynyuk¹, O.A. Babych²,
A.O. Alyoshin², O.M. Voitenko¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: khaskin1969@gmail.com

²«Foreign Trade Office of China-Ukraine E.O.Paton Institute of Welding» Ltd. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

³NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. 37 Prospect Beresteisky, Kyiv, 03056, Ukraine.

Research papers devoted to development of laser-plasma processes during the last two decades are reviewed. It was found that the current directions of scientific research of the processes of laser-plasma welding are focused mainly on studying the peculiarities of joint impact of constricted arc plasma and laser radiation with wave length of 1.03 – 1.07 μm (first of all, fiber laser) on steels and alloys, as well as studying the physical fundamentals of manifestation of the synergic (hybrid) effect at such an impact and determination of the possibilities of its practical application. It was determined, in particular, that increase of the effectiveness of synergic effect manifestation is related to improvement of the plasma arc burning conditions in the zone of ionized vapour plume, which forms under the impact of focused laser radiation, as well as simplification of laser keyhole formation due to plasma arc pressure. Ref. 49, Fig. 9.

Keywords: laser-plasma welding, synergic effect, process efficiency, steels, aluminium alloys, industrial application

Надійшла до редакції 06.09.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделропю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» та у видавництвах. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Можлива також передплата на електронні версії журналів.