

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ВИРОБІВ ІЗ ЛЕГКИХ СПЛАВІВ З НЕНАСКРІЗНИМ ПРОПЛАВЛЕННЯМ

В.М. Коржик^{1,2}, В.Ю. Хаскін^{1,2}, С.І. Пелешенко², А.А. Гринюк³, Dong Chunlin¹,
Є.В. Ілляшенко², Yao Yuhui⁴

¹China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangzhou, 510650, China. E-mail: patonjournal@gwi.gd.cn

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

³НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, E-mail: imz.paton.kpi@gmail.com

⁴Shenzhen Hanzhizi Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Road, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, China, E-mail: 514929948@qq.com

Сплави легких металів (зокрема, берилію та алюмінію) застосовуються в різних галузях техніки, наприклад, для виготовлення елементів ракет і літаків. При конструюванні таких елементів техніки виникає необхідність отримання зварних з'єднань із різними типами швів. Для герметизації виробів, приварювання фланців і зварювання тонкостінних конструкцій товщиною до 2-3 мм може застосовуватися лазерне зварювання швами з ненаскрізним проплавленням. При зварюванні берилієвих сплавів утворюються токсичні аерозолі. Така особливість вимагає зниження кількості технологічних експериментів, спрямованих на вибір параметрів режиму. Актуальним підходом до вирішення задачі зварювання легких сплавів є виконання попереднього розрахункового визначення параметрів режимів із подальшою експериментальною перевіркою. Технологічну перевірку можна виконувати на високоміцних алюмінієвих сплавах, близьких за своїми фізико-механічними характеристиками до берилієвих. Тому дану роботу присвячено попередньому визначенню параметрів режиму лазерного зварювання герметизуючим швом із ненаскрізним проплавленням тонкостінних фланців циліндричних деталей та коробчастих виробів з легких металів та сплавів на основі Ве та Al, яке враховує температуру нагріву після зварювання. У роботі запропоновано методику попереднього розрахункового визначення параметрів режиму лазерного зварювання деталей зі сплаву на основі берилію, яка підходить як для наскрізного, так і ненаскрізного проплавлення. Некрізне проплавлення може застосовуватися для приварювання фланців герметизуючим швом. Експериментальна перевірка на зразках із сплавів системи Al-Zn-Mg-Cu та порівняння з літературними даними щодо зварювання берилієвих сплавів показали, що похибка запропонованої методики лежить у межах до 15...20 %. Бібліогр. 15, табл. 5, рис. 9.

Ключові слова: лазерне зварювання, легкі сплави, проплавлення, параметри режиму, похибка, пори, тріщини

Вступ. Сплави легких металів (берилію, алюмінію та магнію) застосовуються в різних галузях техніки. Зокрема, їх застосовують для виготовлення елементів ракет і літаків. При конструюванні таких елементів техніки виникає необхідність отримання зварних з'єднань. При виконанні даних з'єднань застосовуються різні типи швів. У тому числі, для герметизації виробів (наприклад, приварювання фланців) і зварювання тонкостінних конструкцій товщиною до 2...3 мм можуть застосовуватися шви з ненаскрізним проплавленням. У цьому випадку необхідно застосовувати високоефективні зварювальні технології, які дозволяють отримувати гарантовану глибину проплавлення у поєднанні з мінімізацією зварювальних залишкових деформацій. Такий результат найпростіше забезпечити за рахунок застосування зварювання з підвищеною локалізацією термічного впливу на

основний метал. Прикладом одного з найбільш прийнятних способів зварювання є лазерне [1].

Особливістю зварювання конструкцій, що містять берилій (власне з берилію, зі сплавів на його основі та з алюміній-берилієвих сплавів), є токсичність аерозолів, які утворюються в процесі. Така особливість вимагає зниження кількості попередніх технологічних експериментів, спрямованих на вибір параметрів режиму. Аналогічний підхід є бажаним і для вибору параметрів режимів зварювання інших легких сплавів (на основі алюмінію і магнію). Тому актуальним підходом до вирішення даної задачі є виконання попереднього розрахункового визначення параметрів режимів із подальшою експериментальною перевіркою. Попередню технологічну перевірку можна виконувати на високоміцних алюмінієвих сплавах, близьких за своїми фізико-механічними характеристиками до берилієвих.

Коржик В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Хаскін В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Пелешенко С.І. – <https://orcid.org/0000-0001-6828-2110>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Dong Chunlin – <https://orcid.org/0000-0003-2672-5985>, Ілляшенко Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>, Yao Yuhui – <https://orcid.org/0000-0001-7196-1317>

© В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, С.І. Пелешенко, А.А. Гринюк, Dong Chunlin, Є.В. Ілляшенко, Yao Yuhui, 2022

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Дослідження особливостей зварювання деталей з високоміцних берилієвих та алюмінієвих сплавів, наприклад, сплаву системи Be–AlSi, показали, що міцність зварних швів значною мірою залежить від геометрії конструкції, проплавлення та наявності дефектів, але значно меншою – від залишкових напруг [2]. Тому вибір параметрів режиму лазерного зварювання доцільно ґрунтувати на досягненні певної геометрії провару. Одним з основних дефектів лазерного зварювання зазначених легких сплавів є пороутворення, що значною мірою пов'язано з особливостями існування парогазового каналу [3]. Тому необхідно врахувати поведінку парогазового каналу, що утворюється під час поглинання лазерного випромінювання основним металом.

У роботі [4] розглянуто динаміку поведінки зварювальної ванни при лазерному зварюванні алюмінієвих сплавів різних серій. Результати експериментів показали, що при лазерному опроміненні метал випаровується з утворенням парогазового каналу. Потім відбувається поступове плавлення металу, що оточує парогазовий канал, під дією тепла, яке виділяється в ньому. Швидкість зростання глибини каналу прямо пропорційна загальному вмісту елементів із низькою температурою кипіння. На стаціонарній стадії процесу проплавлення глибина та діаметр каналу стабілізуються. У поздовжньому напрямку площа ванни розплаву обернено пропорційна теплопровідності алюмінієвого сплаву. Швидкість поглинання лазерного випромінювання змінюється залежно від відношення глибини парогазового каналу до його діаметра та досягає найбільшого значення 58 %. У разі, якщо поверхневий натяг та тиск віддачі парів металу врівноважені, вдається уникнути різких коливань форми каналу.

Крім поведінки парогазового каналу, на зварюваність високоміцних легких сплавів впливають металургійні аспекти. Основними труднощами при зварюванні цих сплавів є гаряче розтріскування, утворення пор, розтріскування на дефектах (порах), зниження пластичності у швах та зонах термічного впливу (ЗТВ). Шляхами вирішення даних проблем можуть бути [5]: контроль співвідношення Fe/Al в основному металі для зниження схильності до утворення гарячих тріщин, мінімізація вмісту оксидів та початкового розміру зерна для обмеження утворення тріщин на дефектах та підвищення пластичності, а також вибір процесу зварювання та оптимізація його параметрів.

Для зниження гарячого розтріскування зварних з'єднань доцільно оптимізувати такі параметри режиму, як потужність лазерного випромінювання, швидкість зварювання, питома потужність та поло-

ження фокусу [6]. Цей підхід дозволяє мінімізувати погонну енергію зварювання. Додавання присаджувального металу з іншим хімічним складом також сприяє зниженню чутливості до розтріскування. Таким чином можна підвищити пластичність з'єднань, що сприяє усуненню тріщин [7]. Для зниження пороутворення та підвищення міцності швів необхідно не допускати попадання оксидної плівки (Al_2O_3 та/або BeO) у зварювальну ванну [8]. Для цього безпосередньо перед зварюванням доцільно усувати цю плівку з поверхонь, що зварюють.

Зазначимо, що застосування присаджувальних матеріалів при зварюванні берилієвих сплавів не завжди є можливим. Так, при виготовленні деяких спеціалізованих берилієвих деталей для космічних супутників (наприклад, циліндричних корпусів елементів джерел енергії, що працюють при температурі понад 600 °C) недопустимо попадання в зварні з'єднання сторонніх хімічних елементів, що не дозволяє застосовувати зварювальні присаджувальні матеріали або замінювати зварювання пайкою [9]. Це робить бажаним застосування лазерного зварювання без присадки.

При виготовленні низки виробів авіакосмічної техніки за допомогою зварювання вирішується завдання герметизації внутрішніх порожнин і відсіків, із розташованими в них компонентами електронної техніки. У цих випадках необхідно як забезпечити герметичність таких відсіків, так і уникнути залишкових деформацій та напруг в конструкції. Для цього необхідно використовувати зварювальні технології, які забезпечують одержання порівняно вузьких швів із локальним тепловкладанням. Загальний нагрів виробу після зварювання не повинен перевищувати 100...120 °C. Таке завдання добре вирішується за рахунок застосування лазерного зварювання.

Таким чином, при виборі параметрів режиму лазерного зварювання герметизуючим швом легких сплавів доцільно орієнтуватися на отримання ненаскрізного проплавлення із формою, близькою до трикутної. При цьому шов повинен виконуватися з мінімальною погонною енергією без використання присаджувального матеріалу.

Цілі та завдання дослідження. Метою дослідження є попереднє визначення параметрів режиму лазерного зварювання герметизуючим швом із ненаскрізним проплавленням тонкостінних фланців циліндричних деталей та коробчастих виробів з легких металів та сплавів на основі Be та Al, яке враховує температуру нагріву після зварювання.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

– розрахункове визначення параметрів режиму лазерного зварювання легких сплавів на основі Be та Al з ненаскрізним проплавленням;

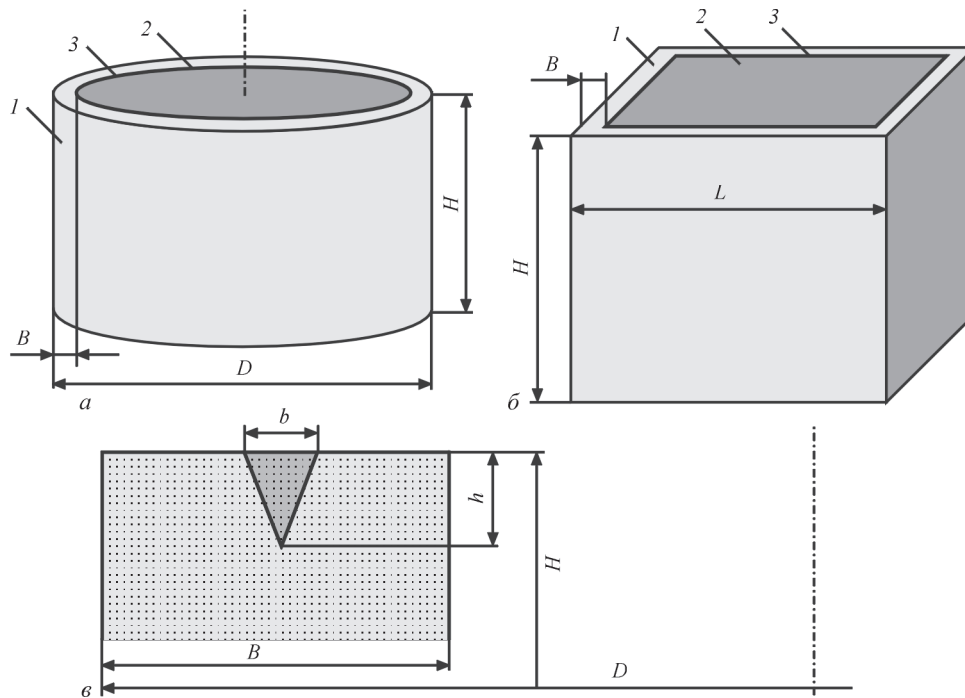


Рис. 1. Геометричні параметри деталей, що зварюються, і лазерного провару (темна трикутна ділянка): 1 – корпус; 2 – фланець, що приварюється; 3 – зварний шов

– розрахункове визначення температур нагріву невеликих виробів зі сплавів на основі Be та Al, що зварюються лазерним способом;

– експериментальна перевірка вибраних параметрів режиму лазерного зварювання зразків із алюмінієвого сплаву та температури їх нагрівання.

Прогнозування параметрів режиму лазерного зварювання високоміцних легких сплавів. При зварюванні тонкостінних виробів герметичними швами дискові або прямокутні фланці можуть приварюватися до циліндричних або коробчастих конструкцій з легких сплавів. Основні параметри цих конструкцій показано на рис. 1. Розглянемо два випадки. У першому до циліндричного корпусу діаметром D , висотою H і товщиною стінки B приварюється дисковий фланець близької товщини (рис. 1, а). У другому до коробчастої конструкції шириною L і висотою H (варіант – $L = H$) зі стінками товщиною B приварюється прямокутний фланець близької товщини (рис. 1, б). В обох випадках зварний шов (спрощено) має форму трикутника з основою b , яка є шириною шва, та висотою h , яка є глибиною проплавлення (рис. 1, в). Для спрощення розв'язуваної задачі приймемо припущення: $D = L = H = 40...50$ мм, $B = 1,5$ мм.

Для зниження небезпеки виникнення залишкових деформацій та схильності до утворення гарячих тріщин бажано уникнути підвищення температури деталі, що зварюється, понад $100...120$ °С. Тому постановку та вирішення теплової задачі приварювання фланця деталі з берилієвого (алюмінієвого) сплаву розділимо на два пов'язані між собою, але досить автономні завдання:

– вибір технологічних параметрів зварювання (потужності джерела нагрівання, швидкості зварювання), виходячи з геометричних розмірів зварного шва;

– визначення температурних параметрів деталі після зварювання.

Вибір параметрів технологічного режиму лазерного зварювання високоміцних легких сплавів. При визначенні параметрів режиму лазерного зварювання виходитимемо з того, що маси циліндричної та коробчастої деталей приблизно рівні. В обох випадках деталі порожнисті. Тоді маса деталі, що зварюється, являє собою порожнистий циліндр діаметром D і товщиною стінки B , складає

$$m_{piece} = \frac{\pi}{4} \gamma H \left[D^2 - (D - 2B)^2 \right], \quad (1)$$

а маса шва

$$m_w = \pi \gamma (D - B) S_{weld}, \quad (2)$$

де γ – густина металу (берилію або алюмінію).

Залежності питомої теплоємності берилію та алюмінію від температури T представлені на рис. 2 [10]. Зазначимо, що берилій має найбільшу теплоємність серед металів, яка сильно залежить від температури. Як видно з рис. 2, а, значення теплоємності при кімнатній температурі та температурі плавлення відрізняються приблизно втричі (ділянка c_{solid}). Більше того, при плавленні відбувається стрибкоподібне зменшення теплоємності. Теплоємність рідкого берилію вивчена слабо, при температурах трохи вище за температуру плавлення вона постійна [10], тобто не залежить від температури (ділянка c_{liquid}). Врахуємо це у тепловому балансі, яким опишемо процес лазерного зварювання.

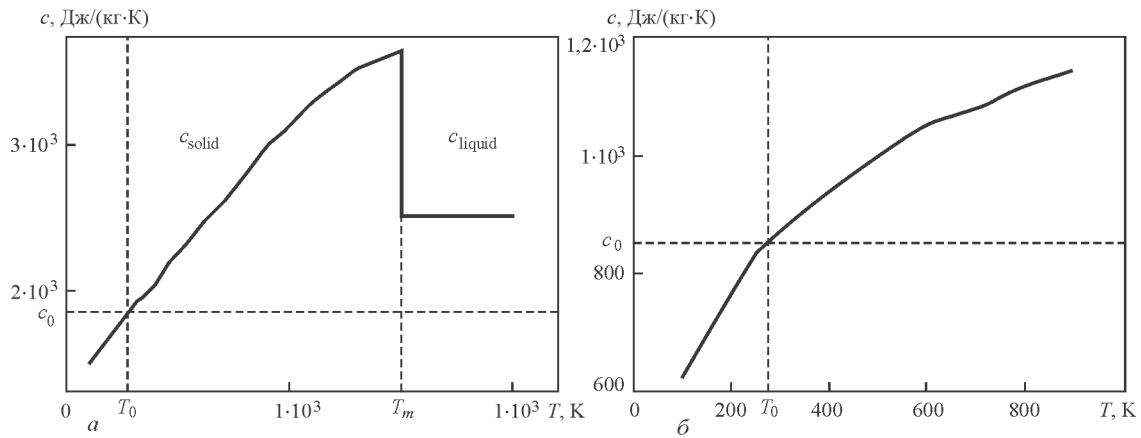


Рис. 2. Залежності питомої теплопровідності берилію (а) та алюмінію (б) від температури T : T_0 – температура навколишнього середовища; T_m – температура плавлення; c_0 – питома теплоємність за нормальних умов, наведена у довідковій літературі [10]

Вся енергія, що віддається лазерним випромінюванням металу, який зварюється, витрачається на його нагрівання до температури плавлення, власне плавлення, нагрівання рідкого металу до температури кипіння і часткове випаровування металу. Рівняння теплового балансу має вигляд

$$(1 - \beta)P_L = \gamma v S_{weld} \times \left[\int_{T_0}^{T_m} c_{solid}(T) dT + q_m + \int_{T_m}^{T_{max}} c_{liquid}(T) dT + \xi q_{ev} \right], \quad (3)$$

де P_L – потужність випромінювання лазера; β – віддзеркалювана здатність металу; v – швидкість зварювання; q_m та q_{ev} – прихована теплота плавлення та пароутворення; ξ – частка металу, що випарувався (зазвичай, вона становить 3...5 %); T_{max} – максимальна температура нагрівання металу.

Рівняння (3) записано для лазерного зварювання з парогазовим каналом. При цьому максимальна температура T_{max} на кілька градусів перевищує температуру кипіння металу T_b .

Користуючись рівнянням (3) теплового балансу, можна визначити технологічні параметри зварювання залежно від необхідних розмірів зварного шва. Наприклад, швидкість зварювання

визначається глибиною проплавлення та потужністю лазера, що застосовують

$$v = \frac{(1 - \beta)P_L}{\gamma S_{weld} \left[\int_{T_0}^{T_m} c_{solid}(T) dT + q_m + \int_{T_m}^{T_{max}} c_{liquid}(T) dT + \xi q_{ev} \right]}. \quad (4)$$

Із застосуванням формули (4) було розраховано залежності швидкості лазерного зварювання від глибини проплавлення за різних потужностей лазерного випромінювання (рис. 3). По них легко вибрати такий важливий технологічний параметр, як швидкість зварювання, щоб забезпечити необхідну глибину проплавлення. При цьому слід зважати на деякі обмеження. Так, при малих швидкостях ширина шва може стати більшою за товщину стінки виробу, що неприпустимо. При великих – можливе виникнення дефектів формування зварного шва типу підрізів та несплавень.

На рис. 4 зображено залежність швидкості лазерного зварювання від потужності лазера за різних глибин проплавлення. За допомогою даних рис. 3 і 4 можливо вибрати швидкість зварювання та потужність випромінювання, що дозволяють досягти необхідної глибини проплавлення при забезпеченні відповідних якості та герметичності виробу.

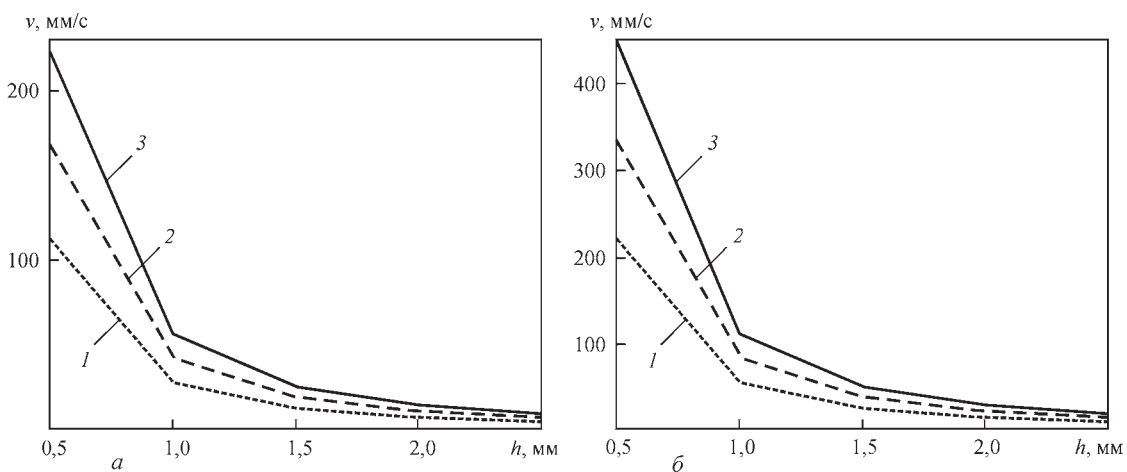


Рис. 3. Залежність швидкості v лазерного зварювання берилію (а) і алюмінію (б) від глибини h проплавлення при різних потужностях P_L лазера: 1 – $P = 500$ Вт; 2 – 750; 3 – 1000

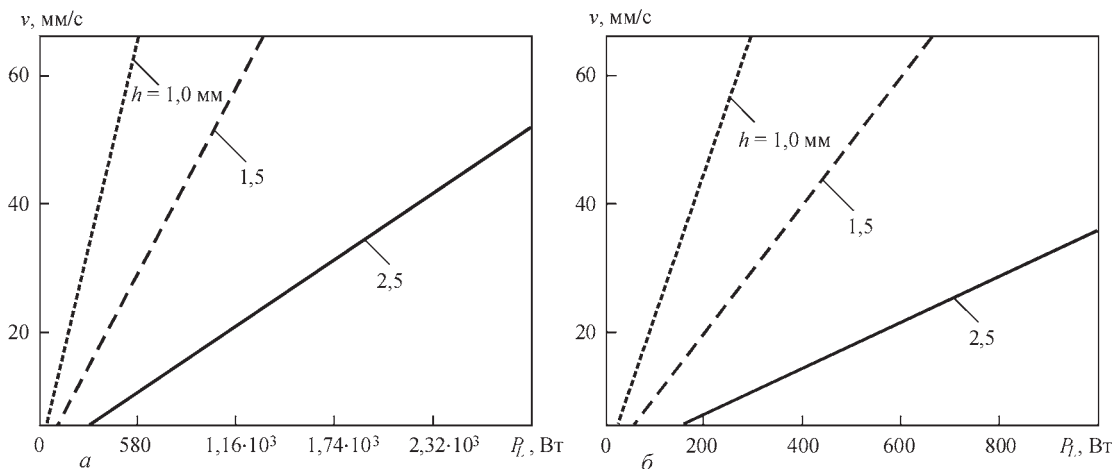


Рис. 4. Залежність швидкості v лазерного зварювання берилію (а) і алюмінію (б) від потужності P_L лазера при різних глибинах проплавлення h

Рис. 4 свідчить про перспективність застосування технологічних режимів зварювання, при яких швидкість змінюється в межах 30...70 мм/с, а потужність лазера – від 500 до 2000 Вт для берилію і від 300 Вт до 1000 Вт для алюмінію. При цьому процес лазерного зварювання забезпечується без застосування додаткових технологічних прийомів та обладнання.

З рівняння (3) можна визначити потужність лазера, необхідну для забезпечення потрібної глибини проплавлення. Очевидно, що вона визначається також швидкістю зварювання

$$P_L = \frac{\gamma v S_{weld}}{1 - \beta} \times \left[\int_{T_0}^{T_m} c_{solid}(T) dT + q_m + \int_{T_m}^{T_{max}} c_{liquid}(T) dT + \xi q_{ev} \right] \quad (5)$$

На рис.5 зображені залежності потужності лазера від швидкості лазерного зварювання за різних глибин проплавлення. За цими залежностями можна визначити діапазони потужностей випромінювання, необхідних для приварювання з ненаскрізним проплавленням фланців завтовшки $\delta \sim 1,5$ мм до корпусів з не меншою товщи-

ною стінки. Для випадку зварювання берилієвих сплавів це діапазон 800...1200 Вт, для випадку зварювання алюмінієвих сплавів – 400...800 Вт. Такі діапазони потужностей дозволяють зварювати з прийнятними швидкостями, а також перекрити досить широкі діапазони глибин проплавлення.

На рис. 6 зображено залежності потужності лазера від глибини проплавлення при різних швидкостях лазерного зварювання. Ці залежності показують, що для забезпечення провару з гарантованою глибиною 1,0...1,5 мм достатньо застосування лазера потужністю 800...1600 Вт для берилієвих сплавів та 400...1000 Вт для алюмінієвих.

Таким чином, запропонована методика дозволяє зробити попередні оцінки технологічних параметрів зварювального процесу, а також обрати обладнання (зокрема, технологічний лазер), що є необхідним для здійснення процесу.

Розрахунок середньої температури виробу після локального нагрівання в процесі зварювання. Для визначення температури деталі після зварювання виходитимемо з того, що температура локального нагріву виробу в зоні шва (темна трикутна ділянка на рис. 1.) набагато вища за

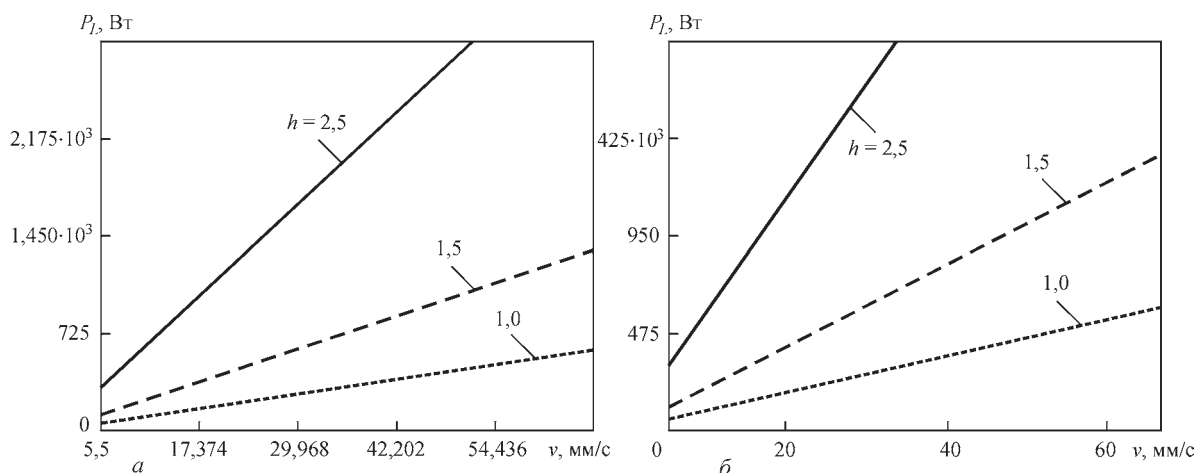


Рис. 5. Залежність потужності P_L лазера від швидкості v зварювання берилію (а) і алюмінію (б) при різних глибинах проплавлення h

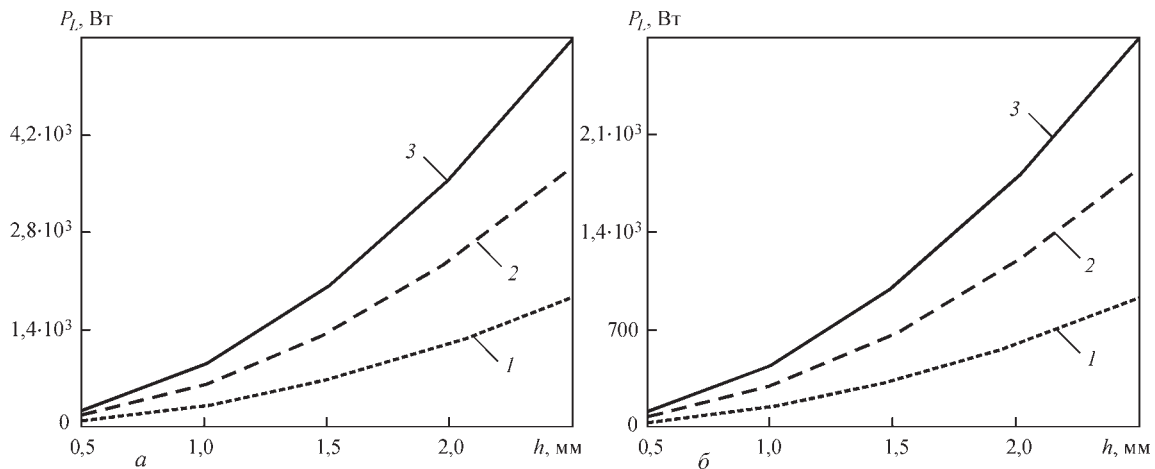


Рис. 6. Залежність потужності P_L лазера від глибини проплавлення h при різних швидкостях v лазерного зварювання берилію (а) і алюмінію (б): 1 – $v = 16,67$; 2 – $33,3$; 3 – 50 мм/с

температуру виробу. При остиганні шва його температура та температура виробу вирівнюються. Якщо позначити середню температуру T_x , то рівняння балансу енергії виглядає так:

$$m_w \left[\int_{T_x}^{T_m} c_{solid}(T) dT + q_m + \int_{T_m}^{T_{max}} c_{liquid}(T) dT \right] = m_{piece} \int_{T_0}^{T_x} c_{solid}(T) dT \quad (6)$$

Іншими словами, енергія, яка виділяється при охолодженні як рідкого металу, так і металу, що закристалізувався, спільно з прихованою теплою плавлення, витрачається на нагрівання решти виробу від температури навколишнього середовища T_0 до температури T_x .

Рівняння (5) є нелінійним з тією особливістю, що невідома входить до нього як межа інтегрування визначених інтегралів.

Для вирішення подібних рівнянь ще немає усталених методик. Тому ми модифікували відомі методи чисельного розв'язання нелінійних рівнянь. Однією з проблем, що виникають під час вирішення рівняння (6), була проблема значних витрат часу при розрахунках. Це пояснювалося

необхідністю на кожному етапі ітерації чисельно знаходити значення двох інтегралів зі змінною межею. Ситуація ускладнювалася тим, що функції, які знаходяться під знаком інтеграла, задавалися таблицею, тобто по точках. Для досягнення прийнятної точності доводилося застосовувати кубічну сплайн-інтерполяцію.

Тому в результаті виконання розрахунків був отриманий не дуже великий масив даних (табл. 1 і 2), яких все ж таки достатньо для попередніх оціночних висновків. Численні експерименти проводилися за наступних постійних параметрах: зовнішній діаметр деталі $D = 40$ мм; висота деталі $H = 50$ мм; температура навколишнього середовища $T_0 = 27$ °С, для табл. 2 товщина стінки $B = 1,5$ мм.

Аналіз отриманих результатів показав, що є можливим вибір параметрів зварювального процесу, які забезпечують отримання таких розмірів шва, за наявності яких не досягається перегрів виробу понад 100 °С. Так, для зварювання тонкостінних ($B = 1,5$ мм) виробів бажано, щоб ширина шва не перевищувала $1,5$ мм.

Найбільший вплив на нагрівання виробу мають товщина стінки виробу B і ширина зварного шва b . При виборі параметрів режиму слід врахову-

Таблиця 1. Залежність середньої температури T_x виробу від товщини B його стінки (ширина зварного шва $b = 1,0$ мм)

Товщина стінки виробу B , мм	Середня температура T_x (Ве сплав), °С	Середня температура T_x (Al сплав), °С
1,0	88	83
1,2	80	77
1,5	74	71
2,5	63	61
3,0	61	59

Таблиця 2. Залежність середньої температури T_x виробу від ширини зварного шва b (товщина стінки виробу $B = 1,5$ мм)

Ширина зварного шва b , мм	Середня температура T_x (Ве сплав), °С	Середня температура T_x (Al сплав), °С
0,5	54	53
1,0	74	71
1,2	85	81
1,5	106	100
2,5	203	186

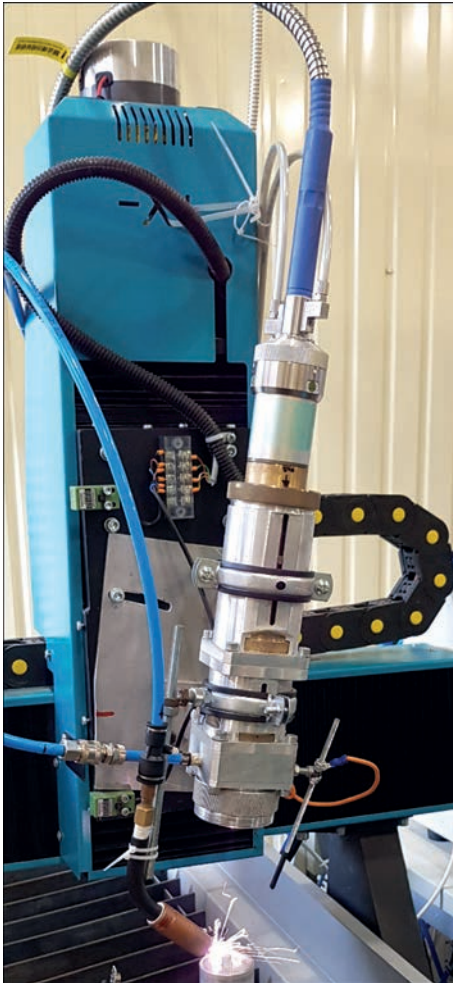


Рис. 7. Лабораторний стенд для проведення експериментів з лазерного приварювання фланців герметичними швами з не-наскрізним проплавленням тонкостінного циліндричного виробу з алюмінієвого сплаву

вати, що зварювання на підвищених швидкостях сприяє зменшенню ширини шва. Тому перспективним є застосування високошвидкісних режимів зменшення середньої температури виробу.

Експериментальна перевірка вибраних параметрів лазерного зварювання. Для виконання експериментальної перевірки створено лабо-

Таблиця 3. Вміст хімічних елементів (мас. %), використаних в дослідженнях алюмінієвих сплавів і розглянутого берилієвого сплаву

Марка сплаву	Al	Be	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Інше
7005 (1915)	Основа		до 0,35	до 0,40	до 0,10	0,2...0,7	1,0...1,8	0,06...0,2	4...5	0,01...0,06	Zr 0,08...0,2; інше до 0,15
7075	Основа		до 0,40	до 0,50	1,2...2,0	до 0,30	2,1...2,9	0,18...0,28	5,1...6,1	до 0,20	до 0,15
Lx-59-3	38	59	–	–	–	–	3	–	–	–	–
Lx-40-3	57	40	–	–	–	–	3	–	–	–	–

Таблиця 4. Основні фізико-механічні характеристики розглянутих алюмінієвих і берилієво-алюмінієвих сплавів (при нормальній температурі)

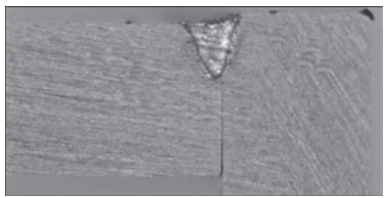
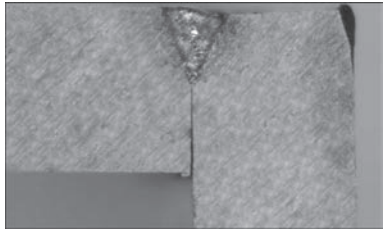
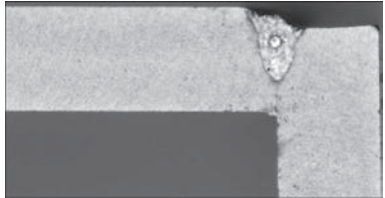
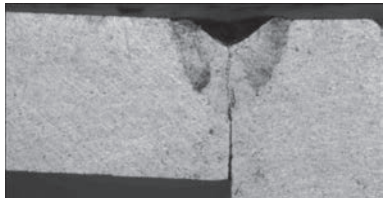
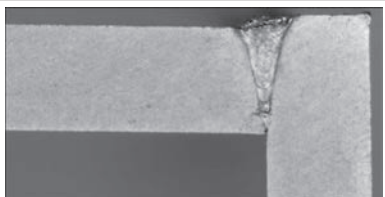
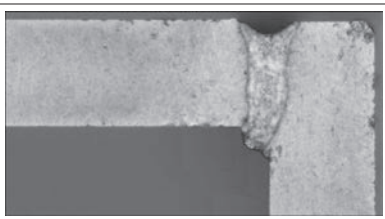
Марка сплаву	Межа плинності σ_T , МПа	Межа міцності σ_B , МПа	Відносне подовження, %	Модуль Юнга E , ГПа	Густина ρ , кг/м ³	Твердість HV , МПа
7005 (1915)	245...290	355...400	8...12	72	2770	90...95
7075	450...500	510...570	3...11	71,7	2810	150...160
Lx-59-3	280...480	220...490	1...9	175...200	2100	250
Lx-40-3	350...490	250...530	1...9	180...200	2100	250

раторний стенд на базі волоконного лазера моделі MFSC 2000W (фірма MAX, Китай) потужністю до 2000 Вт. Випромінювання цього лазера фокусувалося показаною на рис. 7 зварювальною головою в пляму діаметром близько 0,2 мм оптикою з фокусною відстанню 200 мм. Зварювання виконували у захисті аргону з витратами 8...10 л/хв. Щоб уникнути небезпеки отруєння зварювальними аерозолями, в експериментах використовували виключно алюмінієві сплави. В якості матеріалу зразків вибрали алюмінієві сплави 7005 (1915) і 7075 системи Al–Zn–Mg–Cu, які за своїми фізико-механічними характеристиками найбільш близькі до промислових берилієво-алюмінієвих сплавів системи Be–Al–Mg (табл. 3, 4). З цих сплавів виготовляли плоскі та циліндричні зразки з товщиною стінки $B = 1,5$ мм. Плоскі зразки розміром $50 \times 50 \times 1,5$ мм зварювали лінійними кутовими швами, циліндричні зразки розміром 40×50 мм зварювали кільцевими швами.

Зварювання зразків проводили згідно з розрахунковими параметрами режимів (рис. 3–6). Так, для отримання з'єднання з глибиною проплавлення $h \sim 0,6$ мм згідно з даними рис. 3, б рекомендується вибирати швидкість зварювання 150 мм/с при потужності лазерного випромінювання $P_L = 500$ Вт. За даними рис. 5, б при цьому знадобиться швидкість 66,7 мм/с при потужності випромінювання до 400 Вт. За даними рис. 6, б при швидкості зварювання 50 мм/с потужність випромінювання має бути у межах $P_L = 350 \dots 400$ Вт. Під час проведення експерименту було обрано потужність $P_L = 400$ Вт і швидкість $v = 66,7$ мм/с. В результаті був отриманий шов глибиною $h \sim 0,6$ мм і шириною $b \sim 0,6$ мм (табл. 5).

Таким чином, згідно з рис. 3, б – 6, б було обрано ряд параметрів режимів, згідно яких проводилися експерименти з лазерного зварювання. Режими та отримані результати (у вигляді макрошліфів поперечних перерізів швів) наведено у табл. 5.

Таблиця 5. Порівняння розрахункових параметрів режимів з експериментальними результатами лазерного зварювання сплаву 7075

Номер п/п	Варіанти розрахункових параметрів режиму / h	Експериментально встановлені параметри режиму / h, b	Похибка (за параметром h), %	Результат ($\times 30$)
1	1) $P_L = 300$ Вт, $v = 67$ мм/с 2) $P_L = 500$ Вт, $v = 200$ мм/с $/h = 0,5 \dots 0,53$ мм	$P_L = 350$ Вт, $v = 67$ мм/с $/h = 0,51$ мм; $b = 0,5$ мм	2...4	
2	1) $P_L = 350$ Вт, $v = 67$ мм/с 2) $P_L = 500$ Вт, $v = 150$ мм/с $/h = 0,55 \dots 0,6$ мм	$P_L = 400$ Вт, $v = 67$ мм/с $/h = 0,63$ мм; $b = 0,62$ мм	5...15	
3	1) $P_L = 500$ Вт, $v = 50$ мм/с 2) $P_L = 750$ Вт, $v = 80$ мм/с $/h = 1,0$ мм	$P_L = 500$ Вт, $v = 58$ мм/с $/h = 1,1$ мм; $b = 0,86$ мм	10	
4	1) $P_L = 500$ Вт, $v = 42$ мм/с 2) $P_L = 750$ Вт, $v = 66$ мм/с $/h = 1,2 \dots 1,3$ мм	$P_L = 500$ Вт, $v = 50$ мм/с $/h = 1,18$ мм; $b = 1,28$ мм	2...9	
5	1) $P_L = 500$ Вт, $v = 28$ мм/с 2) $P_L = 750$ Вт, $v = 33$ мм/с $/h = 1,3 \dots 1,5$ мм	$P_L = 600$ Вт, $v = 50$ мм/с $/h = 1,34$ мм; $b = 0,86$ мм	3...11	
6	1) $P_L = 500$ Вт, $v = 25$ мм/с 2) $P_L = 750$ Вт, $v = 37$ мм/с $/h = 1,5 \dots 1,6$ мм	$P_L = 650$ Вт, $v = 33$ мм/с $/h = 1,5$ мм; $b = 0,77$ мм	2,5	

При виконанні експериментів по зварюванню на режимах, наведених у табл. 5, проводили вимірювання температури нагрівання зразків (рис. 8). При цьому використовували інфрачервоний пірометр моделі GM320 (Benetech Shenzhen Jumaoyuan Science And Technology Co., Ltd, м. Шеньчжень, КНР) із діапазоном вимірювань $-50 \dots +380$ °C і похибкою до 1,5 °C. Заміри температури виконували у ближній до шва зоні бокової поверхні зварної конструкції безпосередньо по закінченню процесу зварювання. Дистанція вимірювання $Y = 300 \dots 500$ мм.

Наприклад, для отримання швів із глибиною проплавлення $h \sim 1,0$ мм згідно з даними табл. 5 ви-

конали зварювання зі швидкістю $v = 58$ мм/с за потужності випромінювання 500 Вт. Після зварювання за допомогою оптичного пірометра вимірювали температуру зварного зразка. Виконані вимірювання показали, що температура знаходилася в межах 70...75 °C, що з похибкою до 6 % відповідає даним табл. 1 і 2. Подальші експерименти показали, що розбіжність розрахункових і дослідних даних з нагрівання зварних зразків не перевищує 10 %.

Порівняння таких розрахункових та експериментально встановлених параметрів режимів, як потужність P_L і швидкість v зварювання, а також глибини провару h дозволяє говорити про те, що згідно із за-



Рис. 8. Схема вимірювань температури нагрівання зразків після зварювання за допомогою ручного інфрачервоного пірометра (штрихова лінія візуалізує лазерний приціл)

пропонованою розрахунковою методикою параметри режиму лазерного зварювання легких сплавів можуть бути визначені з похибкою до 15 %. Така точність є прийнятною у технологічних розрахунках.

Обговорення результатів формування з'єднань легких сплавів лазерним зварюванням. Проведені технологічні дослідження показали прийнятний рівень похибки запропонованої розрахункової методики. Можна припустити, що розбіжність у розрахункових та експериментальних результатах пов'язана, у тому числі, з урахуванням здатності віддзеркалювання β основного металу. Цей показник залежить як від температури нагрівання металу [11], так і від наявності на крайках, що зварюються, залишків оксидної плівки, яка поглинає лазерне випромінювання значно краще чистого алюмінію [12]. Прикладом є провар глибиною $h \sim 1,18$ мм (табл. 5, п. 4). У цьому випадку спостерігалось значне збільшення обсягу переплавленого металу, що виражається у розширенні зварного шва, без суттєвого збільшення потужності випромінювання. Такий ефект може пояснюватися зниженням втрат випромінювання (коефіцієнта β) через попадання у зварювальну ванну оксидної плівки Al_2O_3 .

Дослідження виконаних в сплавах 7005 і 7075 швів показали, що характерними дефектами їх формування є внутрішні пори і тріщини. Пори утворювалися не во всіх швах, а лише в певних випадках (наприклад, табл. 5, пп. 2 і 3). Їх розмір знаходиться в межах 0,05...0,2 мм, розташування – переважно в середній частині швів. Розташування пор вздовж шва має нерегулярний характер, відстань між ними коливається від 2,5 до 50 мм і більше (рис. 9). Проте, місця їх виникнення переважно збігаються із полосами прокатки зварюваних листів. Можна припустити, що виникнення цих пор пов'язано з потраплянням до зварювальної ванни дрібних часток оксидної плівки Al_2O_3 , а також повітря. Останнє потрапляє з нижньої сторони зварюваного стику, яка немає газового захисту. Тріщини утворювалися, переважно, при ненаскріз-

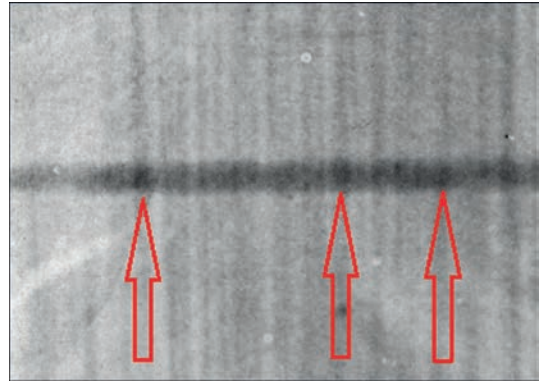


Рис. 9. Визначення за результатами радіографічного контролю пор в шві (провар в листі сплаву 7075, виконаний на режимі п. 3, табл. 5)

ному зварюванню сплаву 7075 в кореневій частині швів (див. табл. 5, п. 4). Схильність до їх утворення збільшується зі збільшенням ширини швів. Вірогідно, не повністю проварений стик працює як концентратор напружень, що у купі із залишковими напруженнями сприяє тріщиноутворенню.

Ще одним підтвердженням прийнятності запропонованої розрахункової методики можна вважати досить точне (із похибкою до 10 %) визначення температури післязварювального нагрівання тонкостінних виробів, розміри яких зазначені вище. Для перевірки прийнятності розрахункової методики при зварюванні берилієвих сплавів було проведено порівняння розрахункових результатів із деякими літературними даними.

Так, у роботі [13] наводяться дані зварювання берилію товщиною 0,35 мм імпульсним Nd:YAG-лазером. Зварювання виконувалось зі швидкістю 3,3 мм/с при щільності потужності випромінювання 260 Вт/мм². Для нашого випадку (випромінювання волоконного лазера, що фокусується в пляму діаметром 0,2 мм), це відповідає потужності ~ 10 Вт (з урахуванням втрат). Можна припустити, що для зварювання берилію товщиною 0,35 мм випромінюванням потужністю $P_L \sim 100$ Вт швидкість зварювання становитиме близько 33,33 мм/с, а для товщини 0,7 мм знадобиться $P_L \sim 300$ Вт і $v = 66,67$ мм/с. З графіка рис. 4, а слідує, що для виконання провару глибиною порядку 0,7 мм з потужністю $P_L \sim 300$ Вт необхідна швидкість $v \approx 66,67$ мм/с. З графіка рис. 5, а випливає, що для виконання провару глибиною порядку 0,7 мм зі швидкістю $v = 55$ мм/с потрібна потужність $P_L \sim 300$ Вт. Тобто, розбіжність експериментальних та розрахункових значень становить менше 20 %.

В роботі [14] описано зварювання берилієвих сплавів електронно-променевим способом. Через різницю в тисках при електронно-променевому і лазерному зварюванні їх порівняння є не зовсім коректним. Так, при лазерному зварюванні вплив атмосфери низького тиску призводить до збіль-

шення глибини проплавлення на 10...20 % [15]. Проте, виконаємо таке порівняння для одержання оціночних результатів. Для електронно-променевого зварювання пластин товщиною 1,5 мм обрані наступні параметри режиму: напруга, що прискорює, $U = 100$ кВ, струм пучка $I = 7$ мА, швидкість зварювання $v = 8,5$ мм/с. При цьому щільність потужності електронного пучка становить $\sim 14 \cdot 10^4$ Вт/см², що відповідає потужності лазерного пучка ~ 300 Вт. Можна припустити, що при еквівалентній лазерній потужності 600 Вт швидкість зварювання становитиме ~ 17 мм/с. Аналогічні дані отримуємо з графіка рис. 6, а. З урахуванням різниці в тисках можна припустити, що розбіжність експериментальних та розрахункових значень становить до 20 %.

Висновки

1. Запропоновано методику розрахункового визначення параметрів режиму лазерного зварювання тонкостінних (товщиною до 2,5 мм) виробів із високоміцних легких металів та сплавів. Експериментальна перевірка на зразках із алюмінієвих сплавів серії 7xxx системи Al–Zn–Mg–Cu та порівняння з літературними даними щодо зварювання берилієвих сплавів показали, що похибка запропонованої методики становить до 15...20 %.

2. Із застосуванням даної методики обрано основні параметри лазерного зварювання конструкції зі сплаву 7075 із товщиною стінки 1,5 мм швами глибиною та шириною 0,5...1,5 мм. Встановлено, що при зварюванні випромінюванням волоконного лазера потужністю до 650 Вт зі швидкостями не менше 33,3 мм/с забезпечується мінімальне об'ємне нагрівання виробів не вище 100 °С.

3. Розв'язання нелінійного рівняння теплового балансу дозволило визначити температуру нагрівання виробу після зварювання з похибкою до 10 %.

4. Експериментальні дослідження показали, що характерними дефектами лазерного зварювання алюмінієвих сплавів системи Al–Zn–Mg–Cu є внутрішні пори діаметром 0,05...0,2 мм і тріщини в кореневій частині швів при формуванні їх з неповним проплавленням. Формування пор може бути пов'язане із потраплянням в зварювальну ванну повітря зі стику, а тріщин – з роботою стику як надріза-концентратора, який під дією залишкових напружень сприяє тріщиноутворенню.

Присвячення. Автори присвячують дану роботу пам'яті д-ра техн. наук, проф. В.М. Сидорця (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України), завдяки труду якого вона виконана.

Робота виконувалась при підтримці проектів:

1. *The National Key Research and Development Program of China – in the framework of the*

strategy «One Belt – One Road» (grant number 2020YFE0205300);

2. *Strategic project of the Academy of Sciences of Guangdong Province, (GDAS'Project of Science and Technology Development, 2020GDASYL-20200301001), China;*

3. *Project of the Guangzhou Economic and Technological Development Zone 2019GH19, China.*

Список літератури/References

1. Bunaziv, I., Akselsen, O.M., Ren, X. et al. (2021) A Review on Laser-Assisted Joining of Aluminium Alloys to Other Metals. *Metals*, **11**, 1680, 1–40. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11111680>
2. Criss, E.M. (2015) *Surrogacy of Beryllium Welds and Heat Transfer in Metals*, Dissertation for the degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering), University of California, San Diego (USA) – 129 p. Permalink: <http://escholarship.org/uc/item/8sx939v4>
3. Zhao, T., Sato, Y.S., Xiao, R. et al. (2020) Laser pressure welding of Al–Li alloy 2198: effect of welding parameters on fusion zone characteristics associated with mechanical properties. *High Temperature Materials and Processes*, **39**, **1**, 146–156. DOI: <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0047>
4. Miyagi, M., Wang, H., Yoshida, R. et al. (2018). Effect of alloy element on weld pool dynamics in laser welding of aluminum alloys. *Scientific Reports*, **8**, 12944. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31350-4>
5. Hill, M., Damkroger, B.K., Dixon, R.D., Robertson, E. (1990) *Beryllium weldability*, Los Alamos National Laboratory, Materials Weldability Symposium, ASM Materials Week. Detroit, Michigan (USA). Permalink: <https://www.researchgate.net/publication/236557474>
6. Ahn, J., Chen, L., He, E. et al. (2018) Optimisation of process parameters and weld shape of high power Yb-fibre laser welded 2024-T3 aluminium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, **34**, Part A., 70–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.028>
7. Veness, R., Simmons, G., Dorn, C. (2011) *Development of beryllium vacuum chamber technology for the LHC. Proceedings of IPAC2011*, San Sebastián, Spain, TUPS024, 1578–1580.
8. Doshi, S.J., Gohi, A.V., Mehta, N.D., Vaghasiya, S.R. (2018) Challenges in Fusion Welding of Al alloy for Body in White, *Materials Today: Proceedings*, **5**, **2**, 1, 6370–6375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.247>
9. Hanafee, J.E., Ramos, T.J. (1995). Laser Fabrication of Beryllium Components. *2nd International Energy Agency International Workshop on Beryllium Technology for Fusion. Moran, Wyoming (USA)*, September 6–8.
10. Чиркин В.С. (1968) *Термофизические свойства материалов ядерной техники*. Справочник. Москва, Атомиздат.
11. Chirkin, V.S. (1968) *Thermophysical properties of materials of nuclear engineering*: Handbook. Moscow, Atomizdat [in Russian].
11. Khaskin, V.Yu., Korzhik, V.N., Sydorets, V.N. et al. (2015) Improving the efficiency of hybrid welding of aluminum alloys. *The Paton Welding J.*, **12**, 14–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.12.03>
12. Miller, E., Liu, S. (2018) *Laser Welding of Aluminum Alloys*. ASM HANDBOOK ONLINE. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02a.a0006502>
13. Hanafee, J.E., Ramos, T.J. (1995) Laser Fabrication of Beryllium Components. *2nd International Energy Agency International Workshop on Beryllium Technology for Fusion. Moran, Wyoming (USA)*, September 6–8.
14. Campbell, R.P., Dixon, R.D., Liby, A.L. (1978) *Electron-beam fusion welding of beryllium*. Rockwell International (USA), RFP-2621, January 1, 1978.
15. Хаскин В.Ю., Шулым В.Ф., Бернацкий А.В. и др. (2012) Лазерная сварка в атмосфере низкого давления. *Вісник НУК*, **5**, 167–169.
- Khaskin, V.Yu., Shulym, V.F., Bernarsky, A.V. et al. (2012) Laser welding in low pressure atmosphere. *Visnyk NUK*, **5**, 167-169 [in Russian].

SELECTION OF PARAMETERS OF LASER WELDING OF THIN-WALLED ITEMS FROM LIGHT ALLOYS WITH NONTHROUGH THICKNESS PENETRATION

V.M. Korzhyk^{1,2}, V.Yu. Khaskin^{1,2}, S.I. Peleshenko², A.A. Grynyuk³, Dong Chunlin¹, E.V. Ilyashenko², Yao Yuhui⁴¹China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangzhou, 510650, China. E-mail: patonjournal@gwi.gd.cn²E.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 Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Prosp., 03056, Kyiv⁴Shenzhen Hanzhizi Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Road, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, China, E-mail: 514929948@qq.com

Light metal alloys (in particular, beryllium and aluminium) are applied in different engineering fields, for instance for fabrication of rocket and aircraft elements. When designing such engineering elements, there is the need to produce welded joints with different types of welds. Laser welding with nonthrough thickness penetration can be used for item sealing, welding-on flanges and welding thin-walled structures of up to 2-3 mm thickness. Toxic fumes form in welding beryllium alloys. Such a peculiarity requires reducing the number of technological experiments, aimed at selection of mode parameters. An up-to-date approach to solving the problem of light alloy welding is performance of preliminary calculated determination of mode parameters with their further experimental verification. Technological verification can be performed on high-strength aluminium alloys close by their physico-mechanical characteristics to beryllium alloys. Therefore, this work is devoted to preliminary determination of mode parameters of laser welding by a sealing weld with nonthrough thickness penetration of thin-walled flanges of cylindrical parts and box-shaped items from light metals and alloys based on Be and Al, taking into account the temperature of heating after welding. A procedure of preliminary calculated determination of mode parameters of laser welding of parts from a beryllium-based alloy is proposed in the work, which is suitable for both through-thickness and nonthrough-thickness penetration. Nonthrough-thickness penetration can be applied for welding-on flanges by a sealing weld. Experimental verification on samples from alloys of Al–Zn–Mg–Cu system and comparison with published data on beryllium alloy welding showed that the error of the proposed procedure is in the range of up to 15 – 20%. 15 Ref., 5 Tabl., 9 Fig.

Keywords: laser welding, light alloys, penetration, mode parameters, error, pores, cracks

Надійшла до редакції 14.04.2022

РОЗРОБЛЕНО В ІЕЗ

РІЗАННЯ ВИБУХОМ ПІД ВОДОЮ ПРИ БУДІВНИЦТІ МОРСЬКИХ ПЛАТФОРМ

Процес будівництва стаціонарних платформ проходить у кілька етапів: виготовлення основи платформи на заводі, її транспортування до місця установки, установка і кріплення, остаточне добудування. Для керування плавучістю основи до неї кріпляться понтони, які видаляються після установки на місце майбутньої експлуатації.

При будівництві в Азербайджанському секторі Каспійського моря стаціонарної платформи МСП-7 до неї з двох сторін за допомогою зварювання в шести місцях трубами діаметром 1784 мм із товщиною стінки 25 мм були прикріплені 2 понтони. Понтони являють собою рамкову конструкцію, виготовлену із труб діаметром 4160 мм вагою 489 т і водотоннажністю 2269 т. Понтони відділялися від корпусу платформи енергією вибуху по одному, з різанням в 3-х місцях на глибині 30 м і в 3-х місцях на глибині 12 м.

Використання запропонованої технології дозволяє скоротити час виконання робіт як мінімум в 2...3 рази при додатковій економії витрат на матеріали і устаткування. Отриманий при проведенні цих робіт досвід показав, що розділове різання під водою енергією вибуху доцільно з точки зору скорочення строків виконання робіт та їх вартості.



Перенесення заряду водолазом до місця встановлення



Базова платформа МСП-7 з варними понтонами



Сегментний заряд



Різнаний понтон на поверхні