

ОСОБЛИВОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ НАГРІВАННЯ МІЦНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ І БЕРИЛІЮ (Огляд)

С.І. Пелешенко³, В.Ю. Хаскін^{1,2}, В.М. Коржик^{1,2}, В.В. Квасніцький^{2,3}, А.А. Гринюк^{2,3},
І.М. Клочков², Д. Чунлин¹, А.О. Альошин^{1,2}

¹Китайсько-український інститут зварювання Академії наук провінції Гуандун, Гуандунська ключова лабораторія перетворених зварювальних технологій. 510650. Китай, Гуанчжоу, вул. Чансін 363

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

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

Проаналізовано результати зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання широкої номенклатури легких сплавів. Показано, що характерними дефектами з'єднань є гарячі тріщини, внутрішні пори, знеміцнення навколошовної зони, провисання швів, підрізи та нерегулярний характер формування валика підсилення. Встановлено, що для отримання якісних з'єднань необхідно ретельно обирати параметри режимів зварювання, видаляти оксидну плівку з крайок заготовок перед зварюванням, забезпечувати надійний захист зварювальної ванни, в окремих випадках доцільно застосовувати присадні матеріали та попередній або супутній підігрів. Одним з прогресивних способів мінімізації схильності до утворення значених дефектів є застосування гібридних лазерно-дугових і лазерно-плазмових способів зварювання. Зварні шви, отримані електронно-променевим і лазерним (CO₂- і волоконний лазер) способами зварювання, досить схожі візуально, за макроструктурною будовою, а також основними характеристиками. Дещо відмінними для різних способів зварювання є параметри міцності швів та необхідна для повного проплавлення металу погонна енергія (завичай для волоконного лазера вона приблизно на 30 % менша). Бібліогр. 54, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: зварювання, лазерне, електронно-променеве, лазерно-дугове, лазерно-плазмове, легкі сплави, алюміній, берилій, дефекти, параметри режимів, механічні властивості

Вступ. Алюміній, магній, берилій, а також їхні сплави широко застосовують при виготовленні сучасної техніки, зокрема, в авіа- і ракетобудуванні, що обумовлено унікальним поєднанням властивостей: низької щільності при високих значеннях питомої міцності, корозійної стійкості та теплопровідності. Різноманітність конструкцій з цих матеріалів, а також схильність зварних з'єднань до утворення дефектів викликає необхідність пошуку нових способів зварювання зазначених сплавів. Висока теплопровідність ускладнює розробку класичних дугових зварювальних технологій цих сплавів. Одним з найбільш радикальних способів зменшення впливу теплопровідності на залишковий напружено-деформований стан зварних конструкцій є застосування висококонцентрованих теплових джерел, зокрема лазерних, лазерно-дугових, лазерно-плазмових і електронно-променевих. Зварювання такими висококонцентрованими джерелами нагрівання дозволяє досягати високих показників продуктивності, якості отриманих з'єднань, має високу стабільність та хорошу повторюваність результатів. Однак в літературі є відомості щодо впливу параметрів режимів та умов процесу зварювання на формування зварних з'єднань, їхня схиль-

ність до утворення дефектів не завжди збігається, тому дослідження особливостей одержання з'єднань з легких сплавів на основі алюмінію й берилію із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії є актуальними.

Постановка проблеми. Однією з основних проблем лазерного зварювання легких сплавів є висока відбивна здатність з'єднуваного матеріалу або низький коефіцієнт поглинання ним лазерного випромінювання, який становить до 10 % для довжини хвилі 1,06 мкм [1]. Це сприяє зменшенню ефективного ККД процесу лазерного зварювання. Крім того, процеси зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання ускладнюються через високі значення теплопровідності цих сплавів: 236 Вт/(м·К) для алюмінію та 201 Вт/(м·К) для берилію за нормальних умов [2]. Ще однією проблемою є наявність термодинамічно стійкої оксидної плівки (Al₂O₃ або BeO) на зварюваних поверхнях, потрапляння якої в литий метал шва призводить до його механічного ослаблення [3]. Самі по собі легкі сплави досить чутливі до впливу навколишнього середовища, схильні до утворення у швах оксидних включень і пор при взаємодії з атмосферою повітря [4].

Пелешенко С.І. – <http://orcid.org/0000-0001-6828-2110>, Хаскін В.Ю. – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Квасніцький В.В. – <http://orcid.org/0000-0002-7756-5179>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Клочков І.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6490-8905>, Чунлин Д. – <https://orcid.org/0000-0003-2672-5985>, Альошин А.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9696-6800>

С.І. Пелешенко, В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, В.В. Квасніцький, А.А. Гринюк, І.М. Клочков, Д. Чунлин, А.О. Альошин, 2022

Металургійні процеси зварювання висококонцентрованими джерелами енергії легких сплавів відрізняються існуванням парогазового каналу (keyhole), інтенсивністю випаровування легуючих елементів, а також особливостями кристалізації за умов дії термічного циклу зварювання. При лазерних і гібридних процесах додатково необхідно враховувати взаємодію основного металу з газами навколишнього середовища. Практична реалізація процесів зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання легких сплавів пов'язана з низкою особливостей, що відбиваються на технології, виборі методу і режимів, а також властивостями одержуваних зварних з'єднань.

Метою даної роботи є огляд сучасних досягнень у галузі зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання легких сплавів на основі алюмінію і берилію, які застосовують в авіаційній, ракетній та космічній техніці, визначення основних особливостей процесів зварювання і шляхів усунення характерних недоліків.

Для досягнення мети нами проаналізовано особливості процесів зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання легких сплавів на основі алюмінію і берилію; виділено основні загальні особливості зварювання та фізичне моделювання процесу зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання легких сплавів, що характеризуються незадовільною технологічною здатністю до зварювання.

Аналіз особливостей зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання легких сплавів на основі алюмінію і берилію. Завдяки високим механічним властивостям у сучасній промисловості значний інтерес викликає питання зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів систем Al–Mg–Si (серія 6xxx) [5], Al–Zn–Mg–Cu (серія 7xxx) [6], а також алюмінієвих сплавів, легованих літієм (система Al–Mg–Li) і скандієм (система Al–Cu–Li–Sc) [7]. До широко застосовуваних високоміцних берилієвих сплавів, в першу чергу, відносять трикомпонентні «Локалої» системи Al–Be–Mg марок Lx-59-3 (59Be, 3Mg), Lx-40-3 (40Be, 3Mg) [8]. Основні механічні властивості найбільш поширених легких сплавів наведено у табл. 1. Відзначимо, що зварювання таких сплавів

утруднене у зв'язку з їхньою схильністю до утворення гарячих тріщин і пор.

На відміну від електронно-променевого зварювання [9] розробка технологій зварювання лазерним випромінюванням потребує ретельного захисту шва від впливу навколишнього середовища [10]. У разі зварювання легких сплавів зазвичай використовують такі гази, як гелій, аргон, а також їх суміші. З точки зору газового захисту в зоні дії лазерного випромінювання доцільно застосовувати гази з високим потенціалом іонізації. Рекомендується така схема газового захисту шва при лазерному зварюванні [11]: захист зварювальної ванни та поверхні шва гелієм з витратою 8...10 л/хв, а кореня шва – аргоном з витратою 5...8 л/хв. Особливістю такого газового захисту є стрибкоподібне збільшення глибини проплавлення після подолання певних граничних значень енергії випромінювання. При гібридному лазерно-дуговому зварюванні з дугою плавкого електрода для мінімізації пороутворення і збільшення глибини проплавлення рекомендують до захисного газу аргоном додавати 50 % гелію [12].

Окрім газового захисту, при лазерному [13] і лазерно-дуговому [14] зварюванні можливе застосування флюсового захисту поверхні та кореня шва. Перед зварюванням на поверхню стику та його кореневу частину шляхом фарбування наносять спеціально розроблені флюси. Застосування флюсового захисту дозволяє зменшити вимоги до попереднього збирання стику, збільшуючи можливий зазор між зварювальними крайками у 2...3 рази [15]. До складу флюсів можуть входити графіт, порошки металів, фториди лужних і лужноземельних металів. Такі матеріали сприяють збільшенню коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання, покращують поверхневу активність розплаву, забезпечують високий коефіцієнт поверхневого натягу розплаву флюсу. Застосування флюсів для лазерного і гібридного зварювання легких сплавів призводить до перерозподілу балансу енергії, що пов'язано зі збільшенням поглинання енергії випромінювання та видаленням оксидної плівки. При цьому збільшується ефективний ККД процесу, зменшується межа критичної щільності потужності, характерна для лазерного зварювання легких сплавів. На відміну

Таблиця 1. Основні фізико-механічні характеристики деяких алюмінієвих і берилієво-алюмінієвих сплавів (при нормальній температурі) [5, 6, 8]

Марка сплаву	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Модуль Юнга, ГПа	Густина, кг/м ³	Твердість HB, МПа
5083	130...160	200...280	15	69	2720	70
6061	145...276	240...310	9...14	69...70	2700	65...95
7005	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

від газового флюсовий захист забезпечує плавне збільшення глибини проплавлення при зростанні енергії, що вводиться.

Як правило, зварюваність легких сплавів висококонцентрованими джерелами нагрівання аналогічна їх зварюваності традиційними дуговими джерелами. У табл. 2 наведено дані зварюваності алюмінієвих сплавів.

Одним з важливих аспектів специфіки зварювання алюмінієвих і берилієвих сплавів є різниця температур плавлення та коефіцієнтів поглинання самих металів та їхніх оксидних плівок. Алюміній і берилій схильні до інтенсивного окиснення при температурах, перевищуючих температуру плавлення. Оксидна плівка має високу температуру плавлення (>2000...2500 °C) і не розплавляється в процесі зварювання, хоча може частково вигоряти через інтенсивне поглинання лазерного випромінювання. Ця плівка характеризується високою адсорбційною здатністю до газів і водяної пари, що призводить до появи у зварювальній ванні газів, пор та різних несучільностей [3]. Частинки плівки можуть потрапляти у зварювальну ванну, утворюючи оксидні включення у швах, що зменшує механічні властивості зварних з'єднань. Тому при лазерному і гібридному зварюванні застосовують спеціальні прийоми, які сприяють руйнуванню та видаленню плівки оксидів і захисту металу від повторного окиснення – від попереднього механічного усунення до лазерного випалювання [17].

Основною відмінністю лазерного зварювання легких сплавів є пороговий характер проплавлення, який починається лише після досягнен-

ня певного рівня щільності потужності (близько 10^6 Вт/см²) [15]. Це пояснюється поєднанням високих коефіцієнтів відбиття, теплопровідності, теплоємності сплавів алюмінію і берилію. При введенні достатньої кількості енергії після початку процесу плавлення коефіцієнт відбиття різко зменшується і відбувається інтенсивне проплавлення металу з утворенням парогазового каналу. Поріг щільності потужності залежить від довжини хвилі випромінювання, параметрів фокусування, швидкості зварювання, товщини та стану поверхні пластин, а також складу матеріалу. Він може бути суттєво зменшеним при гібридному зварюванні в результаті дії дугової або плазмової складової процесу [18].

Наявність порогового рівня потужності лазерного випромінювання, який забезпечує проплавлення при зварюванні, робить особливо актуальним правильний вибір параметрів режимів. Так, автори роботи [15] визначили, що для сплаву 1560 (аналог 5083) потужність CO₂-лазера на рівні 2,0...2,2 кВт забезпечує глибину проплавлення близько 1,5...2,0 мм. За меншої потужності випромінювання проплавлення практично відсутнє через причини високого коефіцієнту відбиття зазначені вище. Подальше збільшення потужності випромінювання призводить до практично лінійного зростання глибини проплавлення.

На сьогодні одними з найперспективніших промислових лазерів визнано волоконні [19]. Однак їх використання може призводити до таких проблем якості формування кореня шва, як нестабільне проплавлення, викиди розплаву і нерів-

Таблиця 2. Зварюваність алюмінієвих сплавів [16]

Серія сплаву	Застосування	Зварюваність	Виключення	Присаджений сплав
1xxx	Технічно чистий алюміній (Al > 99 %). Провідники електричного струму, вироби з високою корозійною стійкістю тощо	Легкозварювані	Ні	Частіше за все 1100
2xxx	Високоміцні аерокосмічні алюмінієві сплави («дюралі»), переважно застосовують у вигляді листів і плит	Переважно незварювані через велику схильність до гарячого розтріскування	Зварюються сплави 2219 і 2519	2319 або 4043
3xxx	Середньоміцні алюмінієві сплави легко піддаються формуванню. Застосовують для теплообмінників, кондиціонерів	Легкозварювані	Ні	4043 або 5356
4xxx	Застосовують для конструкцій і як сплави для зварювання або паяння	"	"	4043
5xxx	Переважно для високоміцних листів та плит	"	Для зварювання 5083 застосовують 5183 або 5556	5356
6xxx	Для пресованих профілів, листів та плит тощо	За відповідної технології хороша зварюваність	Схильні до гарячого розтріскування	4043, 5356
7xxx	Високоміцні аерокосмічні сплави	Переважно незварювані через схильність до гарячого розтріскування і корозії під дією механічних напружень	Зварюються сплави 7003 та 7005 для пресованих профілів та сплав 7039 для листів	5356

ність [20]. Це пов'язано з підвищенням тиску на дно ванни (keyhole effect) при використанні волоконного лазера замість CO₂-лазера, тому виникає необхідність у проведенні досліджень із зварювання волоконним лазером легких сплавів.

Для проведення досліджень із зварювання волоконним лазером у роботі [15] використовували комплекс на основі волоконного ітербієвого лазера фірми «ІРЕ-Полюс» ЛЗ-3,5 потужністю 3,5 кВт. Дослідження показали, що рівень щільності потужності, необхідної для початку проплавлення, при застосуванні волоконного лазера приблизно в 2 рази менший, ніж для CO₂-лазера (рис. 1). В

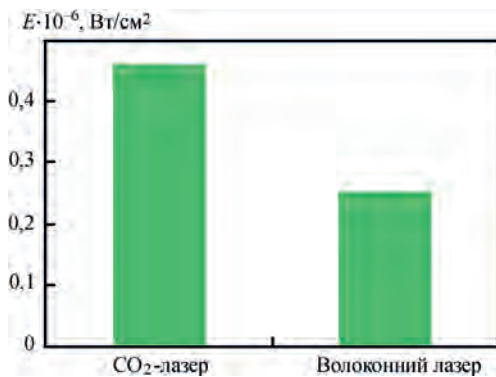


Рис. 1. Залежність порогової щільності потужності проплавлення сплаву 01570 від типу джерела лазерного випромінювання [15]

Таблиця 3. Відношення швидкості режимів зварювання встик пластин зі сплаву 01570 товщиною 2,0 мм різними типами лазерів [15]

Швидкість зварювання, м/хв	Потужність лазерного випромінювання, кВт	
	CO ₂ -лазер	Волоконний лазер
2,0	1,6	1,1
3,0	2,6	1,4
4,0	4,0	1,9

табл. 3, де наведено режими зварювання алюмінієвого сплаву 01570 (AlMg6Mn0.5Sc3) системи Al–Mg–Sc волоконним та CO₂-лазером, видно, що потужність лазерного випромінювання, необхідна для зварювання листа товщиною 2,0 мм волоконним лазером, на 30 % менша, ніж при зварюванні CO₂-лазером. Слід відзначити, що аналогічний сплав досить добре зварюється і електронно-променевим способом [21].

Структури зварених з'єднань алюмінієвих сплавів, отриманих лазерним і електронно-променевим способами, досить близькі [22]. Те саме стосується і з'єднань, отриманих випромінюванням CO₂- і волоконного лазерів. У більшості випадків досліджених зварних з'єднань алюмінієвих сплавів спостерігалися малі ширина шва та об'єм зварювальної ванни. При зварюванні достатньо тонких матеріалів (рис. 2, а) [23] або при певному підвищенні погонної енергії (рис. 2, б) [24] досягається проплавлення з практично паралельними крайками, коефіцієнт форми шва $K < 1$. При цьому заниження та провисання швів знаходяться в допустимих межах. У разі зварювання з недостатньою швидкістю може виникнути провисання шва (рис. 2, в) [25]. Для усунення цього дефекту доцільно застосовувати присадний (а у разі гібридного зварювання – електродний) дріт. Порівняно з традиційним зварюванням дугою плавкого електрода (MIG, GMAW) об'єм розплавленого матеріалу при лазерному або електронно-променевому зварюванні в 2...3 рази менший (рис. 2, з) [26]. Близькі результати спостерігаються при порівнянні висококонцентрованих способів зварювання зі зварюванням дугою неплавкого електрода (TIG) [15, 20].

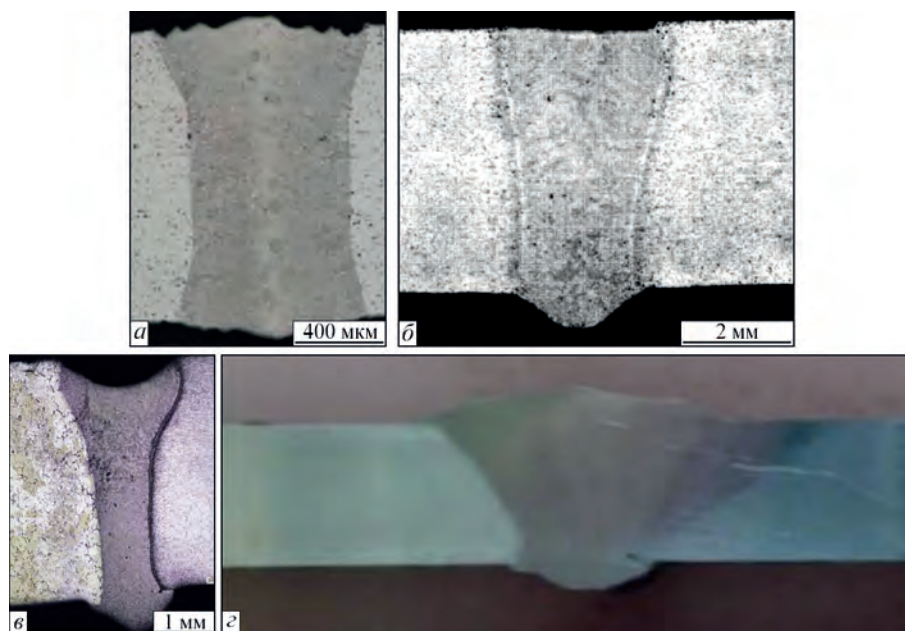


Рис. 2. Результати зварювання алюмінієвих сплавів різними способами: а – лазерний (сплав 6013, товщина 1,25 мм) [23]; б – електронно-променевий (сплав 6061, товщина 5,0 мм) [24]; в – електронно-променевий (сплави 2219 і 5083, товщина 5,0 мм) [25]; з – дугою плавкого електрода (сплав 6013, товщина 5,0 мм) [26]

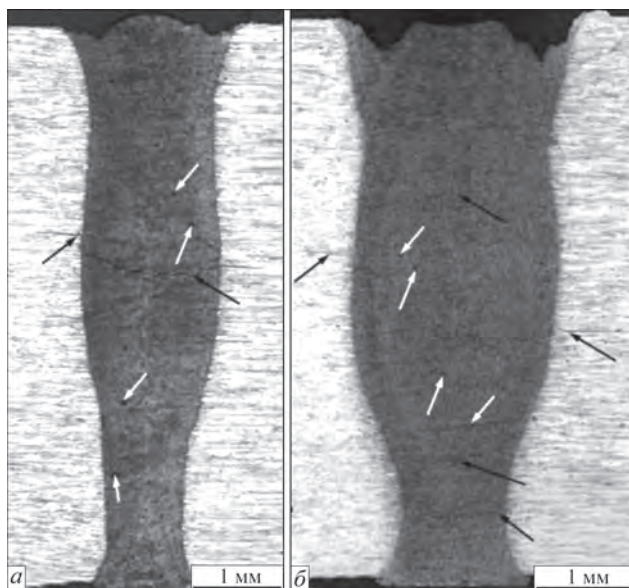


Рис. 3. Мікроструктури поперечних перерізів з'єднань сплаву 7075 (товщина 6,0 мм), отриманих лазерним зварюванням при різних значеннях погонної енергії [27]: *a* – 90; *б* – 180 кДж/м; чорні стрілки вказують на мікротріщини, білі – на мікропористість

Проте не завжди можна досягти певної форми шва шляхом коригування режиму зварювання. Так, при зварюванні висококомічних сплавів на кшталт 7075 для мінімізації таких характерних дефектів, як пори і тріщини, доцільно зменшувати погонну енергію (рис. 3) [27]. Для усунення зазначених дефектів може бути використаний супутній локальний підігрів з одночасним введенням присадного матеріалу, тобто гібридний лазерно-дуговий процес (рис. 4) [28]. Дозування енергії електричної дуги в гібридному процесі дозволяє на 30...60 % зменшити об'єм розплавленого матеріалу [29]. При зварюванні елементів автомобільних конструкцій (так званих TWB – tailored welded blanks) використовують також висококомічні сплави (рис. 5) [30]. Для одержання можливості їхньої механічної деформації (штампування) термічну обробку застосовують після зварювання (відпал з температур порядку 450 °С).

Для усунення заниження шва та досягнення стабільного формування верхнього валика підсилення доцільно застосовувати лазерне зварювання з присадним дротом [31] або гібридне лазер-

но-дугове зварювання [32]. Це дозволяє зменшити вимоги щодо збирання стиків та отримати якісні зварні з'єднання при зазорах між крайками заготовок в діапазоні 0,1...1,0 мм. Діаметр і швидкість подачі дроту підбирають, виходячи з товщини зварюваного матеріалу і швидкості зварювання. Зазвичай діаметр дроту при лазерному зварюванні становить 0,6...1,2, при гібридному – 0,8...1,6 мм. Оптимальний кут подачі дроту знаходиться у межах 15...30° від площини стика. Дріт можна подавати спереду від джерела лазерного випромінювання або за ним по ходу зварювання, що може впливати на ефективність і стабільність процесу.

Одним із характерних дефектів зварювання висококонцентрованими джерелами енергії легких сплавів є схильність до утворення пор як через нестабільність проплавлення (пульсації від keyhole effect) [20], так і під впливом водню, який добре розчиняється в алюмінії й берилії при температурі плавлення [33, 34]. Підвищену схильність до пористості мають при зварюванні алюмінієво-магнієві сплави, оскільки магній збільшує розчинність водню в алюмінії [35]. Для зменшення пористості використовують обробку поверхонь перед зварюванням з метою видалення вологи, адсорбованої поверхнею металу, і оксидної плівки, до складу якої входять гідратовані оксиди. Найбільш ефективно для цього застосовувати механічне або хімічне (травлення) видалення оксидної плівки на ширину до 25...30 мм від крайок заготовок по всій довжині з'єднання [36].

Іншим характерним дефектом зварювання висококонцентрованими джерелами енергії легких сплавів є схильність до утворення гарячих тріщин. Тріщини можуть утворюватися навіть при застосуванні імпульсних процесів зварювання, які порівняно з безперервними процесами дозволяють зменшити енерговкладання в зварюваний матеріал. Найбільш ефективним способом усунення цього дефекту є легування шва введенням присадного матеріалу відповідного складу. Так, при імпульсному лазерному зварюванні термооброблюваного алюмінієвого сплаву Al-4,7Mg-0,32Mn-0,21Sc-0,1Zr без присадного металу і з присадкою зі сплаву Al-5Mg спостерігалось утворення дуплексних (стовпчастих)

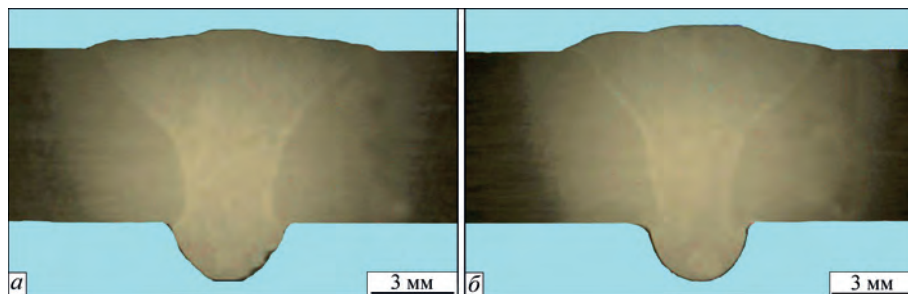


Рис. 4. Мікроструктури поперечних перерізів з'єднань [28], отриманих гібридним лазерно-дуговим зварюванням сплаву 6082 (товщина 6,0 мм) з використанням імпульсної дуги плавкого електрода (*a*) і CMT (cold metal transfer) процесу (*б*)

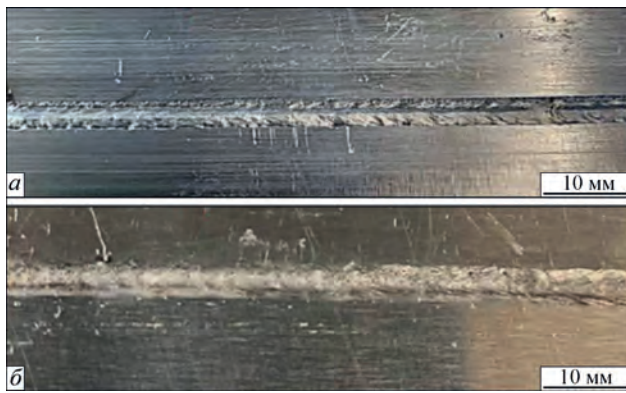


Рис. 5. Зовнішній вигляд зварних з'єднань сплавів 5251 з 6082 [30] (товщина 1,5 мм) у виробі TWB (tailored welded blanks), одержаних електронно-променевим (а) і лазерним (б) способами

і дрібнозернистих) ливарних структур та газової пористості у вигляді дефектів у зоні шва [37]. Використання для зварювання присадного металу типу Al–5Ti–1B забезпечило формування дрібнозернистої структури із середнім розміром зерна $4 \pm 0,2$ мкм без дефектів шва. Середня концентрація легуючих елементів у зварному шві становила $2,8\text{Mg}, 0,2\text{Mn}, 0,1\text{Zr}, 0,15\text{Sc}, 0,1\text{Ti}$. Межа міцності зварного з'єднання на розтягання становила 260 МПа, що відповідало значенням, характерним для основного металу в литому стані. Після відпалу при температурі 370 °С протягом 6 год цей показник збільшився на 60 МПа, що становило 85 % міцності основного металу в стані після прокатування.

Крім зазначених дефектів, неможна невідзначити токсичність зварювальних аерозолів, що виділяються [38]. Оскільки вміст берилію в повітрі не повинен перевищувати 0,001...0,003 мг/м³, тому його зварювання зазвичай виконують у закритих камерах з контрольованою атмосферою, що забезпечується відсмоктуванням та фільтрацією утворених шкідливих хімічних сполук.

Дослідження здатності до зварювання берилію та його сплавів показують, що литі сплави на його основі можна успішно зварювати TIG, електронно-променевим та лазерним способами [39]. Однак на сьогодні для виготовлення відповідальних конструкцій з берилієвих сплавів перевагу віддають вакуумним технологіям таким, як електронно-променеве зварювання та вакуумне паяння [40].

Основними перешкодами для зварювання берилію є гаряче розтріскування, утворення тріщин через дефекти шва та низьку пластичність [40]. Гаряче розтріскування можна зменшити шляхом контролю хімічного складу зварюваного берилію. В роботі [39] запропоновано контролювати співвідношення Fe:Al таким чином, щоб воно сягало менше за 2,4, при цьому вміст заліза і алюмінію повинен бути мінімальним. Розтріскування, пов'я-

зане з наявністю дефектів та обмеженою пластичністю металу, можна зменшити, знижуючи вміст оксиду BeO та розмір зерен вихідного матеріалу. Крім того, зварюваність берилію також можна поліпшити завдяки зменшенню швидкості зварювання, помірному тепловкладенню, мінімізуючи зусилля фіксації зварюваних деталей, також застосуванням відповідного попереднього або супутнього підігріву. У деяких випадках тріщиноутворення у швах може бути успішно усунуте шляхом введення до зварювальної ванни присадки з алюмінієвого сплаву. В цьому випадку слід враховувати, що використання присадного металу може зменшити робочу температуру та межу міцності зварного з'єднання.

Технологічні дослідження особливостей процесів зварювання берилію висококонцентрованими джерелами енергії показали його схильність до утворення гарячих тріщин. Найбільш ефективним шляхом їхнього усунення є зменшення температури локального перегріву зварюваного зразка, що досягається зменшенням погонної енергії зварювання, наприклад, в результаті підвищення щільності потужності випромінювання шляхом фокусування короткофокусною оптикою з одночасним підвищенням швидкості процесу зварювання. При зварюванні берилію виникають також такі дефекти, як випліскування металу та нерегулярність формування швів. Їх можна усунути при коректному виборі режимів зварювання, зокрема швидкості процесу.

Використання спеціальних легованих присадок з алюмінієм при зварюванні берилію та його сплавів дозволяє підвищувати міцність з'єднань від 0,5...0,6 до 0,7...0,8 міцності основного металу при одночасному зростанні пластичності. Введення в шов додаткових легуючих елементів дозволяє збільшити міцність за допомогою післязварювальної термічної обробки, хоча самі по собі сплави системи Al–Be–Mg не є термозміцнісними. Така термічна обробка забезпечує отримання рівномірних основному металу зварних швів [41].

Міцність швів при зварюванні берилієвих сплавів значною мірою залежить від розмірів кристалітів металу шва (рис. 6). Подрібнення структури шва – один із шляхів отримання зварних з'єднань, що наближаються за міцністю до основного металу: при зменшенні розмірів кристалітів у 3...4 рази (від 1,0 до 0,25 мм) межа міцності металу шва зростає в 3 рази (від 137 до 412 МПа) [41].

При виготовленні спеціалізованих берилієвих деталей для космічних супутників, наприклад, циліндричних корпусів елементів джерел енергії, працюючих при температурі понад 600 °С, не допускається потрапляння в зварні з'єднання сто-

ронніх хімічних елементів, через це не дозволяється застосовувати зварювальні присадні матеріали або замінювати зварювання паянням [42]. В цьому випадку застосовували імпульсне лазерне зварювання. Для зварювання корпусу елемен-

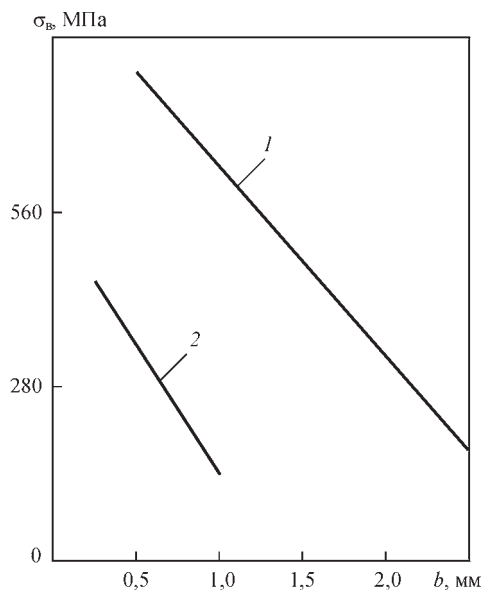


Рис. 6. Залежність межі міцності σ_b берилію та його зварних швів від розміру зерна b [41]: 1 – основний метал; 2 – метал шва

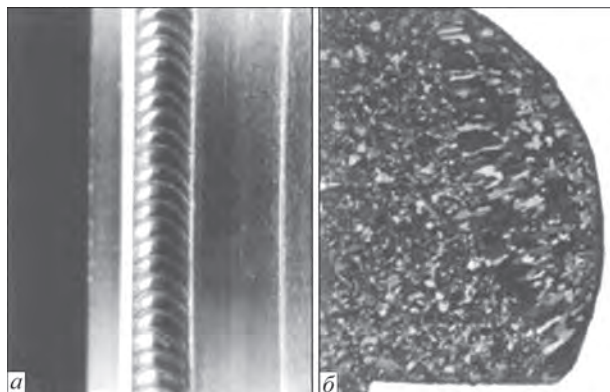


Рис. 7. Лазерне зварювання промислового конструкційного берилію [42]: а – зовнішній вигляд зварного шва діаметром 25,4 мм (лускатість утворена імпульсним зварюванням з перекриттям точок); б – структура поперечного перерізу зони сплавлення, $\times 100$

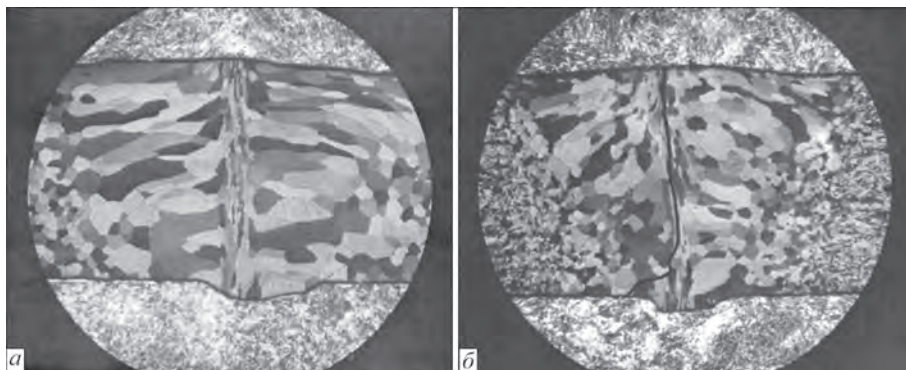


Рис. 8. Мікроструктури ($\times 25$) зварних з'єднань, отриманих електронно-променевим зварюванням берилієвих сплавів [45]: а – сплав С ($\delta = 1,5$ мм), зварений з попереднім підігрівом 400°C , $U = 100$ кВ; $I = 7$ мА; $v = 8,5$ мм/с; б – характерне руйнування зварного з'єднання сплаву А ($\delta = 2,5$ мм) після випробування на розтягання

та джерела енергії його циліндричну частину з кришкою діаметром 25,4 мм, що приварюється кільцевим швом, поміщали в герметичну камеру з інертним газом під необхідним тиском, а промінь Nd:YAG-лазера пропускали через прозоре вікно цієї камери. Розтріскування вдалося уникнути за допомогою застосування для зварювання режиму з імпульсним випромінюванням (рис. 7).

Питання лазерного зварювання берилію та його сплавів у контрольованій атмосфері, а також лазерного і електронно-променевого зварювання у вакуумі вивчали у різних роботах [43–45]. Наприклад, у роботі [45] описано електронно-променеве зварювання берилієвих сплавів: А – 99,58 % Ве + домішки; В – 99,63 % Ве + домішки; С – 99,87 % Ве + домішки. Відзначено схильність зварних з'єднань до утворення гарячих тріщин упоперек шва. При цьому напрямок зростання дендритів при кристалізації металу зварювальної ванни призводив до послаблення поздовжньої осьової ділянки шва (рис. 8).

Дослідження значень залишкових напружень у зварних деталях Ве–AlSi показали, що міцність зварних швів значною мірою залежить від геометричної форми конструкції, глибини проплавлення та наявності дефектів, але значно менше – від рівня залишкових напружень [46]. Для аналізу напруженого стану циліндричних оболонок з берилію в роботі [47] проведено моделювання розподілу температур у процесі їхнього лазерного зварювання. За допомогою чисельного моделювання та багатофакторного регресійного аналізу встановлено вплив потужності лазера, радіуса плями фокусування і його зсуву на розподіл температури в циліндричних оболонках з берилію.

В роботі [48] експериментально встановлено, що зварні з'єднання з берилію, отримані без присадного матеріалу, характеризуються дуже низькою пластичністю з міцністю близько 50 % міцності основного металу. Міцність зварних з'єднань берилію, отриманих з використанням алюмінієвих присадних матеріалів, становила 70 % міцності ос-

новного матеріалу. Отримані з'єднання характеризуються високою пластичністю.

Основні загальні особливості зварювання легких сплавів висококонцентрованими джерелами енергії. Значення мікротвердості у шві та зоні термічного впливу (ЗТВ) при лазерному і електронно-променевому зварюванні легких сплавів істотно, на 20...25 %, вище, ніж при TIG. Зона знеміцнення при лазерному і електронно-променевому зварюванні практично відсутня, тоді як при TIG або MIG зварюванні вона поширюється на відстань до 1,0...1,2 мм і більше від зони сплавлення. Зменшення мікротвердості металу ЗТВ відносно до основного металу становить близько 13...14 %. Твердість ділянок навколошовної зони при зварюванні загартованого матеріалу зменшується порівняно з основним металом. Ділянка знеміцнення за протяжністю при лазерному і електронно-променевому зварюванні в 3...4 рази менша, ніж при дуговому.

Основними недоліками зварювання легких сплавів висококонцентрованими джерелами енергії є схильність до утворення внутрішніх пор і гарячих тріщин. Найбільш ефективними шляхами усунення пор є видалення оксидної плівки перед зварюванням та якісний захист зварювальної ванни від атмосферного повітря. Для усунення тріщиноутворення доцільно зменшувати погонну енергію зварювання та ширину швів, застосовувати присадні матеріали. Ще одним способом усунення тріщин може бути попередній або супутній підігрів зварюваних деталей. З цих позицій значний інтерес становлять гібридні лазерно-дугові та лазерно-плазмові процеси [49].

Застосування оптимальних режимів зварювання легких сплавів висококонцентрованими джерелами енергії, особливо в діапазоні швидкостей вище 1,5...2,5 м/хв, дозволяє суттєво зменшити деформацію деталей [50]. Як показали дослідження, значення поперечної усадки з'єднань, одержаних лазерним зварюванням, в 5...6 разів менше, ніж при TIG зварюванні [31, 51].

Незадовільна технологічна здатність до зварювання сплавів серії 7xxx викликана їх високою схильністю до утворення тріщин, великим коефіцієнтом теплового розширення і низькою температурою випаровування легуючих елементів таких, як цинк і магній, що сприяє виникненню тріщин і пористості в швах. У роботі [52] показано, що шви, отримані лазерним зварюванням, мають більш високу міцність на розрив, ніж при дуговому TIG зварюванні. В роботі [53] показано, що для сплавів серії 7xxx також доцільно застосовувати електронно-променевий спосіб зварювання. Встановлено, що твердість зони сплавлення не покращується після обробки старінням, а власти-

вості ЗТВ погіршуються незалежно від способу зварювання, що свідчить про обмеження можливості підвищення міцності з'єднання під час використання будь-якого процесу зварювання.

Основні результати аналізу зварювання сплавів на основі алюмінію і берилію. Зварювання берилієвих і високоміцних алюмінієвих сплавів доцільно проводити в вакуумі (електронно-променеве) або в камері з контрольованою атмосферою (наприклад, з аргонем при тиску 100...101 Па) з використанням випромінювання волоконного лазера. Для зварювання деталей з малою ($\delta = 1...3$ мм) товщиною стінки швидкість процесу доцільно обирати від 120 м/год і більше (наприклад, 150...200 м/год). При цьому потужність випромінювання знаходиться в межах до 1,0 кВт. Очікувані особливості формування структури швів – збільшення зерна та зростання дендритів у сторони щодо вертикальної осі поперечного перерізу шва. Це призводить до зменшення міцності з'єднання. Ще однією особливістю зварювання берилію є висока схильність до тріщиноутворення. Для усунення небезпеки виникнення тріщин доцільно зменшувати погонну енергію зварювання та застосовувати попередній або супутній підігрів (наприклад, до 150...200 °C).

Межа міцності з'єднань легких сплавів, отриманих зварюванням висококонцентрованими джерелами енергії, залежить від хімічного складу і може становити як 0,8...0,9 міцності основного металу для алюмінієвих сплавів із задовільною технологічною здатністю до зварювання, так і близько 0,5...0,7 для важкозварюваних берилієвих сплавів. Руйнування з'єднань, зварених без присадки, відбувається переважно по шву, а зварених з присадкою – по перехідній зоні. На механічні властивості зварних з'єднань впливає хімічний склад зварного шва, який змінюється внаслідок випаровування легуючих елементів із зварювальної ванни, особливо таких, як магній, літій, цинк тощо. Зменшення вмісту цих елементів у шві після зварювання може досягати до 1,0...1,5 %.

У ряді випадків після зварювання доцільно виконувати додаткову обробку отриманих з'єднань для підвищення їх механічних характеристик. Це може бути термічна обробка (типу відпуск), механічна (наприклад, ультразвукова проковка швів) або будь-яка інша.

Одним з інноваційних способів підвищення якості зварних з'єднань є лазерне ударне зміцнення (LSP) [54], яким були оброблені деталі з алюмінієвого сплаву 7075, попередньо зварені лазерним випромінюванням. Отримані зразки досліджували на корозійну стійкість під дією механічних напружень розтягу за допомогою електронної скануючої мікроскопії (SEM) і випробовували на розтягання

з низькою швидкістю деформації (SSRT). Результати показали, що обробка LSP дозволяє значно підвищити корозійну стійкість з'єднань. Механічні випробування SSRT показали, що у зразків з LSP обробкою час руйнування та статична в'язкість зростають порівняно з необробленими зразками на 11, 20 та 100 % відповідно часу та інтенсивності обробки. LSP також впливає на зміну характеру та розташування зламу – тип розвитку тріщини змінюється від між- до внутрішньокристалітного. Таке покращення властивостей з'єднань пов'язане, в першу чергу, з подрібненням мікроструктури і зменшенням рівня залишкових напружень.

Висновки

1. При зварюванні висококонцентрованими джерелами нагрівання широкої номенклатури легких сплавів можуть виникати такі характерні дефекти, як гарячі тріщини, внутрішні пори, знеміцнення навколошовної зони, провисання швів, подрізи та нерегулярний характер формування валика підсилення. Для мінімізації схильності до утворення зазначених дефектів і отримання якісних з'єднань доцільно ретельно обирати параметри режиму зварювання, перед зварюванням видаляти оксидну плівку з поверхні заготовок, забезпечувати надійний захист зварювальної ванни від впливу повітря, в окремих випадках застосовувати присадні матеріали та попередній або супутній підігрів. Одним з прогресивних способів усунення зазначених дефектів є застосування гібридних лазерно-дугових і лазерно-плазмових способів зварювання.

2. Зварні шви, отримані електронно-променевим і лазерним (CO_2 - і волоконний лазер) способами зварювання, є досить схожими як на вигляд, так і за макроструктурною будовою та основними геометричними характеристиками. Деяко відмінними для різних способів зварювання є параметри міцності швів та необхідна для повного проплавлення металу погонна енергія зварювання, яка зазвичай для волоконного лазера приблизно на 30 % менша, ніж при застосуванні CO_2 -лазера.

3. Об'єм розплавленого металу при зварюванні електронно-променевим і лазерним способами суттєво менший, ніж при дуговому зварюванні. Порівняно із TIG та MIG зварюванням суттєво зменшуються ширина шва, в 3...4 рази ділянка знеміцнення в ЗТВ та в 5...6 разів рівень залишкових деформацій деталей, а мікротвердість шва та ЗТВ збільшується на 20...25 %. Для усунення занижень шва, збільшення припустимого складального зазору, підвищення механічних властивостей та зменшення схильності металу до тріщиноутворення доцільно використовувати присадні легуючі матеріали на основі алюмінію.

4. Електронно-променеве і лазерне зварювання алюмінієвих сплавів забезпечує міцність зварних з'єднань на рівні близько 80...90 % міцності основного металу. У разі зварювання берилієвих сплавів без присадки міцність з'єднань близько 50 % основного матеріалу, а при використанні присадкових матеріалів на основі алюмінію становить близько 70 %.

5. Основною особливістю лазерного зварювання легких сплавів з газовим захистом є наявність порогового значення енергії проплавлення, що обумовлено інтенсивним (понад 90...95 %) відбиттям лазерного випромінювання від поверхні зварювання заготовок, а також високими значеннями теплопровідності сплавів. Для подолання порога проплавлення потрібне вкладення енергії від 10^6 Вт/см². Зварювання крайок заготовок завтовшки до 3,0 мм доцільно виконувати із застосуванням випромінювання волоконного лазера у захисному середовищі аргону зі швидкістю понад 120 м/год при потужності випромінювання до 800...1000 Вт.

6. При зварюванні берилію характер зростання дендритів при кристалізації зварювальної ванни призводить до зменшення міцності шва, можливе виникнення як осьових, так і поперечних гарячих тріщин. Найбільш небезпечними зонами для виникнення тріщин є кратер, який кристалізується, а також дефекти шва. Зменшити схильність зварних швів до утворення тріщин можливо шляхом застосування попереднього підігріву, зменшенням погонної енергії зварювання, використанням присадних матеріалів певного хімічного складу, плавним зменшенням потужності висококонцентрованого джерела нагрівання наприкінці процесу зварювання, видаленням плівки оксиду BeO перед зварюванням, зменшенням розміру зерен вихідного матеріалу.

Робота виконана за підтримки наступних проектів:

The National Key Research and Development Program of China – in the framework of the strategy «One Belt - One Road» (grant number 2020YFE0205300).

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

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

Список літератури/References

1. Steen, W., Mazumder, J. (2010) *Laser Material Processing*. London, Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>
2. Kuneš, J. (2012) *Dimensionless Physical Quantities in Science and Engineering*. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06212-9>
3. Doshi, S.J., Gohil, 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>
4. Хохлатова Л.Б., Блинков В.В., Кондратюк Д.И. и др. (2015) Структура и свойства сварных соединений листов из сплавов 1424 и в-1461, изготовленных лазерной сваркой. *Авиационные материалы и технологии*, **4**, 9–13. DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-4-9-13>
 5. (2019) 6xxx Aluminum Alloy Datasheets, Properties and Selection of Aluminum Alloys. Eds Anderson, K., Weritz, J., Gilbert, J. Kaufman. *ASM Handbook*, **2B**, 374–375. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02b.a0006708>
 6. (2019) 7xxx Aluminum Alloy Datasheets, Properties and Selection of Aluminum Alloys. Eds Anderson, K., Weritz, J., Gilbert, J. Kaufman. *ASM Handbook*, **2B**, 410–412. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02b.a0006726>
 7. Malikova, A.G., Ivanova, M.Yu. (2016) High-strength laser welding of aluminum-lithium scandium-doped alloys. *AIP Conference Proceedings*, **1783**, 020148. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4966441>
 8. Фридляндер И.Н. (2008) *Бериллиевые сплавы – перспективное направление аэрокосмического материаловедения*. ВИАМ/2008-205145.
 9. Urminsky, J., Marônek, M., Bárta, J. et al. (2020) Electron Beam Welding of Aluminium Alloy AW2099. *Materials Science Forum*, **994**, 28–35. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.994.28>
 10. Ma, J., Pierce, K. (2021) New shielding gas mixture for laser conduction welding of aluminum with a filler wire. *Journal of Laser Applications*, **33**, 042018. DOI: <https://doi.org/10.2351/7.0000471>
 11. Cao, X., Wallace, W., Poon, C., Immarigeon, J.-P. (2003). Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. I. Laser Welding Processes. *Materials and Manufacturing Processes*, **18**, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1081/AMP-120017586>
 12. Cai, C., He, S., Chen, H., Zhang, W. (2019) The influences of Ar–He shielding gas mixture on welding characteristics of fiber laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy. *Optics & Laser Technology*, **113**, 37–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.011>
 13. Reisgen, U., Olschok, S., Mavany, M., Jakobs, S. (2011) Laser Beam Submerged Arc Hybrid Welding. *Physics Procedia*, **12**, 179–187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.023>
 14. Reisgen, U., Olschok, S., Engels, O. (2020) Visualization of the molten pool of the laser beam submerged arc hybrid welding process. *Welding in the World*, **64**, 721–727. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00873-8>
 15. Шиганов И., Холопов А. (2010) Лазерная сварка алюминиевых сплавов. *Фотоника*, **3**, 6–10.
 16. Mathers, G. (2002) *The Welding Aluminium and its Alloys. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*, 1st edition, October 8. 978–1855735675
 17. Zhu, G., Wang, S., Cheng, W. et al. (2019) Investigation on the Surface Properties of 5A12 Aluminum Alloy after Nd:YAG Laser Cleaning. *Coatings*, **9**(9), 578–593. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9090578>
 18. Khaskin, V.Yu. (2013) Development of laser welding of aluminium alloys at the E.O. Paton electric welding institute (Review). *The Paton Welding J.*, **5**, 51–55.
 19. Kah, P., Lu, J., Martikainen, J., Suoranta, R. (2013) Remote Laser Welding with High Power Fiber Lasers. *Engineering*, **05**(09), 700–706. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2013.59083>
 20. Powel, J., Ilar, T., Frostevarg, J., Torkamany, M.J. (2015) Weld root instabilities in fiber laser welding. *Journal of Laser Applications*, **27**, S29008-1–S29008-5. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4906390>
 21. Skryabinsky, V.V., Nesterenkov, V.M., Mikitchik, A.V. (2022) Electron beam welding of aluminum 1570 alloy and mechanical properties of its joints at cryogenic temperatures. *The Paton Welding J.*, **1**, 22–25. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.01.03>
 22. Zhan, X., Yu, H., Feng, X. et al. (2019) A comparative study on laser beam and electron beam welding of 5A06 aluminum alloy. *Materials Research Express*, **6**, 5, 056563. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0562>
 23. Coelho, B.N., M.S.F. de Lima, S.M. de Carvalho, A.R. da Costa (2018) A Comparative Study of the Heat Input During Laser Welding of Aeronautical Aluminum Alloy AA6013-T4. *J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos*, **10**, e2918. DOI: <https://doi.org/10.5028/jatm.v10.925>
 24. Çam, G., Ventzke, V., J.F. dos Santos et al. (1999) Characterisation of electron beam welded aluminium alloys. *Science and Technology of Welding & Joining*, **4**(5), 317–323. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217199101537941>
 25. Mastanaiah, P., Sharma, A., Reddy, G.M. (2018) Process parameters-weld bead geometry interactions and their influence on mechanical properties: A case of dissimilar aluminium alloy electron beam welds. *Defence Technology*, **14**, **2**, 137–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.003>
 26. Mercana, E., Ayanb, Y., Kahrama, N. (2020) Investigation on joint properties of AA5754 and AA6013 dissimilar aluminum alloys welded using automatic GMAW Author links open overlay. *Engineering Science and Technology*, **23**, **4**, 723–731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2019.11.004>
 27. El-Batahgy, A.M., Klimova-Korsmik, O., Akhmetov, A., Turichin G. (2021) High-Power Fiber Laser Welding of High-Strength AA7075-T6 Aluminum Alloy Welds for Mechanical Properties Research. *Materials (Basel)*, **14**(24), 7498. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247498>
 28. Han, X., Yang, Z., Ma, Y. et al. (2020) Comparative Study of Laser-Arc Hybrid Welding for AA6082-T6 Aluminum Alloy with Two Different Arc Modes. *Metals*, **10**, 407. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10030407>
 29. 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>
 30. Lalvani, H., Mandal, P. (2021) Cold forming of Al-5251 and Al-6082 tailored welded blanks manufactured by laser and electron beam welding. *Journal of Manufacturing Processes*, **68**, Part A, 1615–1636. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.070>
 31. Шиганов И.Н., Шахов С.В., Холопов А.А. (2012) Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, **6**(6), 34–50. DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-6-224>
 32. Shiganov, I.N., Shakhov, S.V., Kholopov, A.A. (2012) Laser welding of aluminium alloys for aircraft purpose. *Inzh. Zh.: Nauka i Innovatsii*, **6**(6), 34–50. DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-6-224>
 33. Khaskin, V., Korzhyk, V., Peleshenko, S., Wu, B. (2015) Study the impact of technological scheme of a hybrid laser-arc welding on welds formation. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, **2**, 141–150.
 34. Malikov, A., Orishich, A., Karpov, E., Vitoshkin, I. (2019) Laser welding of aluminium alloys for the aircraft industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **681**, 012029, 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/681/1/012029>
 35. Zhao, H., White, D.R., DebRoy, T. (1999) Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys. *International Materials Reviews, ASM International*, 238–266. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066099101528298>
 36. Cao, X., Wallace, W., Immarigeon, J.-P., Poon, C. (2003) Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. II. Metallurgical Microstructures, Defects, and Mechanical Properties. *Materials and Manufacturing Processes*, **18**(1), 23–49. DOI: <https://doi.org/10.1081/AMP-120017587>

36. Xiao, R., Zhang, X. (2014) Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 16, 166–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.10.005>
37. Loginova, I., Khalil, A., Pozdniakov, A. et al. (2017) Effect of Pulse Laser Welding Parameters and Filler Metal on Microstructure and Mechanical Properties of Al–4.7Mg–0.32Mn–0.21Sc–0.1Zr Alloy. *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 7(12), 564–572. DOI: <https://doi.org/10.3390/met7120564>
38. Stange, A.W., Hilmas, D.E., Furman, F.J. (1996) Possible health risks from low level exposure to beryllium. *Toxicology*, 111(1-3), 213–224. DOI: [https://doi.org/10.1016/0300-483x\(96\)03378-1](https://doi.org/10.1016/0300-483x(96)03378-1)
39. 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>
40. 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.
41. Гуревич С.М. (1990) *Справочник по сварке цветных металлов*. Замков В.Н. (ред.). 2-е изд., перераб. и доп. Киев, Наукова думка.
Gurevich, S.M. (1990) *Reference book on welding of non-ferrous metals*. Ed. by V.N. Zamkov. 2nd Ed. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
42. 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*.
43. Falkner, G.E., Ramos, T.J., Murchie, J.R. (1982) *Laser Welding Beryllium in a Deuterium Atmosphere*. Lawrence Livermore National Laboratory Report UCID-19602, Order Number DE83003312, Nov.
44. Manly, W.D., Dombrowski, D.E., Hanafee, J.E. et al. (1995) Report of a Technical Evaluation Panel on the Use of Beryllium for ITER Plasma Facing Material and Blanket Breeder Material. *Sandia National Laboratories (USA), SAND95-1693 UC-420*.
45. Campbell, R.P., Dixon, R.D., Liby, A.L. (1978) *Electron-beam fusion welding of beryllium*. Rockwell International (USA), RFP-2621, January 1.
46. Criss, E.M. (2015) *Surrogacy of Beryllium Welds and Heat Transfer in Metals*: dis. for the degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering), University of California, San Diego (USA). Permalink: <http://escholarship.org/uc/item/8sx939v4>
47. Shao Rong Yu, Yi Xia Yan, Zhi Ming Hao et al. (2009) Analysis of Temperature Distribution and its Influencing Factors in Laser Welding of Beryllium Cylindrical Shells. *Key Engineering Materials*, 419–420, 449–452. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.449>
48. Komarov, M.A., Guitarsky, L.S. (2015) Welding of beryllium. *Welding International*, 29, 7, 561–566. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.952497>
49. Korzhyk, V., Khaskin, V., Grynyuk, A. et al. (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 Journal of Enterprise Technologies*, 1(12(115)), 38–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253378>
50. Bondarev, A.A., Nesterenkov, V.M. (2011) Electron beam welding of thin-sheet three-dimensional structures of aluminum alloys. *The Paton Welding J.*, 6, 36–39.
51. Narsimhachary, D., Ravi N. Bathe, Padmanabham, G., Basu, A. (2014) Influence of Temperature Profile during Laser Welding of Aluminum Alloy 6061 T6 on Microstructure and Mechanical Properties. *Materials and Manufacturing Processes*, 29, 948–953. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2013.872258>
52. Kang, M., Lee, K. (2017) A Review of Joining Processes for High Strength 7xxx Series Aluminum Alloys. *Journal of Welding and Joining*, 35(6), 79–88. DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.12>
53. Klochkov, I.N., Nesterenkov, V.M., Berdnikova, E.N., Motrunich, S.I. (2019) Strength and fatigue life of joints of high-strength alloy AA7056-T351, made by electron beam welding. *The Paton Welding J.*, 1, 10–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.01.03>
54. Wang, J.T., Zhang, Y.K., Chen, J.F. et al. (2015) Effects of laser shock peening on stress corrosion behavior of 7075 aluminum alloy laser welded joints. *Materials Science and Engineering. A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 647, 7–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.084>

FEATURES OF WELDING HIGH-STRENGTH ALLOYS BASED ON ALUMINIUM AND BERYLLIUM USING HIGHLY-CONCENTRATED HEAT SOURCES (Review)

S.I. Peleshenko³, V.Yu. Khaskin^{1,2}, V.M. Korzhyk^{1,2}, V.V. Kvasnitskiy^{2,3}, A.A. Grinyuk^{2,3}, I.M. Klochkov², D. Chunling¹, A.O. Alyoshin^{1,2}

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

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

³NTUU «Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohi Ave., 03056, Kyiv. E-mail: vn.paschenko@ukr.net

Results of welding a wide range of light alloys by highly-concentrated heat sources have been analyzed. It is shown that the characteristic defects are hot cracks, internal pores, HAZ softening, weld sagging, undercuts and irregular reinforcement bead formation. It was found that in order to produce sound joints, it is necessary to thoroughly select welding mode parameters, remove the oxide film from billet edges before welding, ensure reliable protection of the weld pool, and in some cases and it is rational to apply preheating or concurrent heating. One of the advanced methods to minimize the susceptibility to formation of the above-mentioned defects is application of hybrid laser-arc and laser-plasma welding processes. The welds produced by electron beam and laser (CO₂- and fiber-optic lasers) welding processes are quite similar visually, by their macrostructure, as well as the main characteristics. The weld strength parameters and heat input required for full penetration of the metal are somewhat different for different welding methods (for fiberoptic laser it is usually 30 % less). 54 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

Keywords: welding, laser, electron beam, laser-arc, laser-plasma, light alloys, aluminium, beryllium, defects, mode parameters, mechanical properties

Надійшла до редакції 02.10.2022