

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).3](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).3)
УДК 621.791.725

ON CHOICE OF SPATIAL POSITION
FOR LASER WELDING OF AMG6M ALUMINIUM ALLOY

ПРО ВИБІР ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ
ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМГ6М

Artemii V. Bernatskyi

avb77@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8050-5580

Volodymyr D. Shelyagin

laser-77@online.ua

ORCID: 0000-0001-8153-6533

Oleksandr V. Siora

siora@ua.fm

ORCID: 0000-0003-1927-790X

Olena M. Berdnikova

omberdnikova@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9754-9478

Iliia M. Klochkov

klochkov@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0001-6490-8905

Volodymyr M. Sydorets

v.sydorets@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8498-4726

А. В. Бернацький,

канд. техн. наук

В. Д. Шелягін,

канд. техн. наук, ст. наук. співр.

О. В. Сіора,

наук. співр.

О. М. Берднікова,

канд. техн. наук, ст. наук. співр.

І. М. Клочков,

канд. техн. наук, ст. наук. співр.

В. М. Сидорець,

д-р техн. наук, проф.

*E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ*

Abstract. Purpose. The aim of the study was to determine the effect of the spatial position of the laser welding of aluminum alloy AMg6M on the quality, mechanical characteristics and structural parameters of the joints.

Method. In the plates of aluminum alloy AMg6M 6 mm thick, meltdowns (not the entire thickness of the plate) by laser beam at different spatial positions of welding from horizontal to vertical was made. Laser welding was produced upward and downward. An assessment of the quality of the obtained meltdowns based on the results of visual, radiography control and analysis of microscopy research data was carried out. The tilt angle of the plate to obtain the highest quality joint with the least amount of defects was determined. In the selected mode, welding of 2 mm thick AMg6M alloy butt joints was produced. Quality evaluation of these butt joints according to criteria of the current standards were carried out based on mechanical tests, visual and radiography examinations, and microscopy research.

Results. In samples of aluminium alloy AMg6M chains of pores were found along the entire length of the weld at all tilt angles. The X-ray analysis shows a tendency to decrease both the number and size of pores, with a decrease of the slope from 90° to 45°, and their increase with a further decrease of the slope to 0°. This regularity is observed when both downward and upward welding. The smallest number of pores is recorded when downward welding with tilt angle of 60°. It is revealed that the chains of pores are formed mainly in the root part of the weld. Therefore, this defect can be eliminated by achieving a complete meltdown at welding on the substrate, when a force formed back weld containing most of the defects is removed by machining.

Scientific novelty. First time it is revealed, to ensure a more stable formation of high-quality welded joints of aluminium alloy AMg6M and prevent failure of the laser equipment, the welding process must be carried out in an upward vertical spatial position.

Practical importance. The results obtained by the authors were used to create technological recommendations for the manufacture of welded stringer panels for parts and structures of space engineering.

Key words: laser welding; aluminium alloy; spatial position; butt welded joints; quality; structure; mechanical characteristics.

Анотація. Мета. Метою дослідження було встановлення впливу просторового положення під час лазерного зварювання алюмінієвого сплаву АМг6М на якість, механічні характеристики та структурні параметри з'єднань.

Методика. У пластинах алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 6 мм робили провари лазерним випромінюванням, за різних просторових положеннях зварювання – від горизонтального до вертикального. Лазерне зварювання виконували «на підйом» та «на спуск». Проводили оцінку якості одержаних проварів за результатами візуального, радіографічного контролю та аналізу даних металографічних досліджень. Визначали, під яким кутом нахилу пластини одержується найбільш якісне з'єднання з найменшою кількістю дефектів. На обраному режимі виконували зварювання стикових з'єднань зі сплаву АМг6М товщиною 2 мм. За результатами механічних випробувань, візуального, радіографічного контролю та металографічних досліджень цих стикових з'єднань виконували оцінку їхньої якості за критеріями діючих стандартів.

Результати. За всіх кутів нахилу в зразках з алюмінієвого сплаву АМг6М виявлено ланцюжки пор по всій довжині шва. Аналіз рентгенограм показує тенденцію зменшення як кількості, так й розміру пор, у разі зменшення кута нахилу з 90° до 45° , та їх зростання в разі подальшого зменшення кута нахилу до 0° . Така закономірність спостерігається під час зварювання як «на спуск», так і «на підйом». Найменшу кількість пор зафіксовано під час зварювання «на спуск» із кутом нахилу з 60° . Установлено, що ланцюжки пор переважно формуються в кореневій частині шва. Тому цей дефект може бути ліквідований шляхом досягнення повного провару під час зварювання на підкладці, коли примусово сформований зворотний валик шва, який містить більшість дефектів, видаляється шляхом механічної обробки.

Наукова новизна. Вперше встановлено, що для забезпечення більш стабільного формування якісного стикового зварного з'єднання з алюмінієвого сплаву АМг6М та запобігання виходу з ладу лазерного обладнання процес зварювання необхідно проводити у вертикальному просторовому положенні «на підйом».

Практична значимість. Одержані авторами результати використані під час створення технологічних рекомендацій з виготовлення зварних ребристих панелей для деталей та конструкцій ракетно-космічної техніки.

Ключові слова: лазерне зварювання; алюмінієвий сплав; просторове положення; стикові зварні з'єднання; якість; структура; механічні характеристики.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У багатьох галузях промисловості (хімічній та харчовій, енергетиці та суднобудуванні, авіа- та ракетобудуванні тощо) застосовуються алюмінієві сплави для виготовлення виробів різного призначення [1–3]. Конструкція таких виробів часто включає у себе вузли та деталі як малого, так і великого розміру, які мають складну просторову форму. Відповідно, під час створення таких конструкцій із застосуванням технологій зварювання виникає необхідність виконання різноманітних видів зварних з'єднань у різних просторових положеннях [4–6]. Зміна просторового положення під час зварювання може мати як позитивний, так і негативний вплив на якість та формування зварних з'єднань. Лазерне зварювання належить до низки прогресивних технологій [4; 5; 7–9], які широко застосовуються в різних видах промисловості для виготовлення широкого асортименту продукції з алюмінієвих сплавів. Тому виникає задача встановлення впливу просторового положення під час лазерного зварювання алюмінієвих сплавів на якість, механічні характеристики та структурні параметри одержаних зварних з'єднань.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Просторове положення під час лазерного зварювання впливає не лише на форму зварного шва з'єднання, а й на якість з'єднання, яка в даному ви-

падку визначається насамперед кількістю пор. Відомо [9; 10], що найбільш характерна для лазерного зварювання пористість виникає в разі ненаскрізного проплавлення матеріалу. Така пористість являє собою великі порожнини в центральній та нижній частині зварного шва [9–11]. Методом швидкісної рентгеновської зйомки було виявлено [12], що поглинання лазерного випромінювання на передній стінці каналу проплавлення не є рівномірним, а змінюється з часом і в різних ділянках передньої стінки здійснюється по-різному. Саме таким чином місце випаровування металу на передній стінці змінює своє положення з часом. Завдяки великому тиску струменю металу, що випаровується, задня стінка каналу проплавлення постійно й активно змінює свою форму. Струмін парів металу, що утворюється в каналі проплавлення, постійно змінює свій напрямок і швидкість [7; 12]. Нестабільність каналу проплавлення сприяє утриманню газу захисної атмосфери в каналі, що і призводить до утворення пор [9; 11–13].

Відокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз публікацій показує, що актуальною невирішеною проблемою залишається вибір просторового положення лазерного зварювання, яке забезпечує одержання високих показників механічних характеристик та якості стикових зварних з'єднань з алюмінієвих сплавів.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження було встановлення впливу просторового положення під час лазерного зварювання алюмінієвого сплаву АМг6 на якість, механічні характеристики та структурні параметри з'єднань.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом досліджень виступав процес лазерного зварювання алюмінієвого сплаву АМг6 у різних просторових положеннях. Предметом дослідження було встановлення впливу просторового положення під час лазерного зварювання алюмінієвого сплаву АМг6 на якість, механічні характеристики та структурні параметри з'єднань. Зварювання виконували з використанням Nd:YAG-лазера «DY044» виробництва фірми «ROFIN-SINAR» (Німеччина).

Матеріалом дослідження були пластини алюмінієвого сплаву АМг6М (відпаленого) (6%Mg, 0,56%Mn, 0,05%Cu, 0,05%Zn, $\leq 0,02\%$ Zr, 0,14%Si, 0,20%Fe, інше Al) з границею міцності $\sigma_B = 320\text{--}350$ МПа та відносним подовженням $\delta = 15\text{--}20\%$. Твердість основного металу становила 82–83 одиниць HRB.

У пластинах алюмінієвого сплаву АМг6М розміром 300×100×6 мм були зроблені провари, за різних кутів нахилу до горизонтальної площини механізму переміщення лазерної головки та струбцини зі зразком, а саме під кутами 90°, 60°, 45°, 30°, 0°. В усіх експериментах зварювання проводили «на підйом» та «на спуск» (крім нижнього положення). Зварювання виконували у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання на режимі, параметри якого були: потужність лазерного випромінювання – 4кВт; швидкість зварювання – 71,7мм/с, заглиблення фокусної площини лінзи, відносно поверхні, що зварюється, – 1мм, витрати захисного газу (гелію) – 250мм³/с.

Металографічні дослідження виконували відповідно до стандарту ДСТУ EN ISO 17639:2016 «Руйнівні випробування зварних з'єднань металевих матеріалів. Макроскопічне та мікроскопічне оцінювання зварних з'єднань». Зразки для проведення металографічних досліджень готували за допомогою фрезерування, шліфування, полірування і травлення. Зразки досліджували за допомогою оптичної мікроскопії (використовували мікроскоп «МІМ-8»), вимірювання твердості (використовували твердомір «Wilson Rockwell 4JR Hardness Tester») і мікродюрOMETричного аналізу (використовували мікротвердомір «ПМТ-3»). Визначення хімічного складу основного металу виконували за результатами спектрального аналізу, який проводився за допомогою фотоелектричного спектрометра «ДФС-36», згідно з ДСТУ EN 14242:2018 «Алюміній та його сплави. Аналіз хімічного складу. Спектральний аналіз оптичного випромінювання індуکتивно зв'язаної плазми».

За результатами аналізу даних візуального та радіографічного контролю, металографічних досліджень та мікродюрOMETричного аналізу виконували оцінку якості одержаних зразків на відповідність вимогам стандарту ДСТУ EN ISO 13919-2:2015 «Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настапова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 2. Алюміній та його сплави». Визначали, під яким кутом нахилу було одержано найбільш якісне з'єднання з найменшою кількістю дефектів. На обраному режимі виконували зварювання стикових з'єднань зі сплавом АМг6М товщиною 2 мм.

Механічні випробування на статичний розтяг стикових зварних з'єднань проводили на сервогідравлічній машині «MTS 318.25», відповідно до ГОСТ 6996-66. Метою випробування було визначення границі міцності σ_B і розташування місця руйнування у зварному з'єднанні. Випробування на статичний загин стикових зварних з'єднань, одержаних за допомогою лазерного зварювання, проводили за триточковою схемою (використовували пристрій для згинання з двома опорами і оправкою) відповідно до ГОСТ 6996-66. Механічні властивості основного металу визначалися на стандартних зразках відповідно до ГОСТ 1497-84.

За результатами аналізу даних механічних випробувань, візуального, радіографічного контролю та металографічних досліджень одержаних зразків виконували оцінку якості одержаних стикових зварних з'єднань на відповідність вимогам стандарту ДСТУ EN ISO 13919-2:2015.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

За результатами візуального контролю одержаних проварів у зразках алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 6 мм встановлено і зафіксовано, що:

- більш стабільне формування верхнього валика під час зварювання «на підйом», ніж за зварювання «на спуск»;
- більш «сріблястий» колір зовнішньої поверхні під час зварювання «на підйом», ніж за зварювання «на спуск»;
- кількість бризок під час зварювання «на спуск» майже вдвічі більша, ніж за зварювання «на підйом»;
- найбільша кількість бризок під час зварювання «на спуск» на кутах нахилу 45° та 60°;
- під час зварювання «на підйом», зменшуючи кут нахилу з 90° до 0°, збільшується величина підрізу, який відсутній у разі зварювання «на спуск».

За результатами радіографічного контролю в усіх зразках з алюмінієвого сплаву АМг6М виявлено ланцюжки пор по всій довжині шва, з розміром пор від $\varnothing 0,1$ мм до $\varnothing 1,9$ мм. Аналіз рентгенограм показує тенденцію зменшення як кількості, так і розміру пор у зразках з алюмінієвого сплаву АМг6М у разі змен-

шення кута нахилу з 90° до 45° , а також їх зростання в разі подальшого зменшення кута нахилу до 0° під час зварювання як «на спуск», так і «на підйом». Найменша кількість пор спостерігалась під час зварювання «на спуск» із кутом нахилу з 60° .

Згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 13919-2:2015 значення сумарної проекції пор для зварних з'єднань з алюмінієвих сплавів, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях, для досягнення найвищого рівня якості «В» не повинно перевищувати значення 3%. Аналіз одержаних даних дозволяє стверджувати, що за цим показником усі одержані шви відповідають указаним вимогам.

Металографічні дослідження одержаних проварів дозволили встановити, що в залежності від кута між вектором гравітаційної сили та напрямком розповсюдження лазерного випромінювання процесу у зварювальній ванні призводять до значних відмінностей у формі швів, а також до зміни кількості та розміру пор. Чим більше об'єм рідкого металу зварювальної ванни (що характерно для зварювання на спуск), тим вплив зміни кута проявляється більше.

За результатами структурних досліджень з'єднань з алюмінієвого сплаву АМг6М встановлено, що ланцюжки пор формуються переважно в кореневій частині шва. Тому цей дефект може бути ліквідований шляхом досягнення повного провару під час зварювання на підкладці. Досягається це видаленням шляхом механічної обробки примусово сформованого зворотного валика шва, який містить більшість дефектів. Для відпрацювання даної технологічної методики були підготовлені для зварювання на вищенаведеному режимі стикові з'єднання з алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 2 мм.

Проведені дослідження проварів у зразках з алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 6 мм показали, що під час лазерного зварювання відбувається періодичне зростання потужності віддзеркалення лазерного випромінювання від поверхні ванни розплаву, яке проникає в оптичний тракт лазера. Це призводило до аварійного відключення лазерної установки та зупинки процесу. Кількість аварійних відключень відрізняється для різних просторових положень. Вона найбільша для нижнього просторового положення та нелінійно зменшується в разі зростання кута нахилу площини, в якій виконується зварювання, до 90° . У порівнянні зі зварюванням у нижньому просторовому положенні кількість аварійних відключень лазерного обладнання під час зварювання у вертикальному просторовому положенні (у разі кута нахилу 90°) зменшується приблизно у 10 разів.

У результаті аналізу вищенаведених даних було запропоновано виконувати подальші експерименти з лазерного зварювання стикових з'єднань з алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 2,0 мм у вертикальному положенні (зварювання при куті 90°).

А саме зварювання вести «знизу – догори» з метою забезпечення більш стабільного формування якісного зварного з'єднання та запобігання виходу з ладу лазерного устаткування. Під час вибору вертикального просторового положення для лазерного зварювання стикових зварних з'єднань керувалися такими показниками: досягненням максимальної глибини провару; отриманням заданої форми шва зварного з'єднання; відсутністю (або мінімальною кількістю) бризок; відсутністю (або мінімальною величиною) заниження шва; відсутністю (або мінімальною величиною) «гребінця» верхнього валика.

За стикового з'єднання режим лазерного зварювання вибрано так, щоб забезпечити повний проплав, як показано на рис. 1. У результаті спостерігається приварювання стикового з'єднання до технологічної підкладки. Ширина шва в нижній частині дорівнює 1,5 мм та збільшується до 2 мм у верхній частині стикового з'єднання. По всьому об'єму шва спостерігаються окремі пори розміром до 50 мкм. Шов має дендритну структуру. Біля лінії сплавлення напрямком дендритів від основного металу до металу шва. У центральній частині швів дендрити не мають чіткої спрямованості. Твердість металу шва становить 79–81 одиниць HRB, а в зоні термічного впливу (ЗТВ) вона падає до 77 одиниць HRB.

Дослідження мікротвердості стикового зварного з'єднання проводили на приладі ПМТ-3 з навантаженням 0,2 Н. Ступінь подрібнення структури металу шва визначали за допомогою дендритного параметру (d) – середнього розміру поперечних перерізів гілок дендритів або дендритних комірок. Мікротвердість основного металу становить 800–900 МПа. У металі шва найменші значення дендритного параметру (до $d = 2,0$ мкм) та, відповідно, найбільші значення мікротвердості (близько 890 МПа) спостерігаються в його кореневій частині. У верхній частині шва середній розмір дендритів збільшується (до $d = 2,8$ мкм), що призводить до зниження мікротвердості (700–720 МПа). Такий розподіл може бути пов'язаний з особливостями кристалізації металу зварювальної ванни, де процес починається від основного металу та спрямований у верхню частину до центра шва. Так, найбільш легкоплавкі з'єднання витісняються у верхню частину зварного з'єднання, тому тут метал кристалізується в останню чергу, і, відповідно, знижуються механічні властивості. У ЗТВ мікротвердість знижується до 600–700 МПа.

Для стикових зварних з'єднань і основного металу виконано розрахунок тимчасового опору розриву та визначено відносно подовження. Результати випробувань показують, що границя міцності стикових з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 2 мм, одержаних за допомогою лазерного зварювання, становить 311...350 МПа, а відносно подовження – 19...22%.

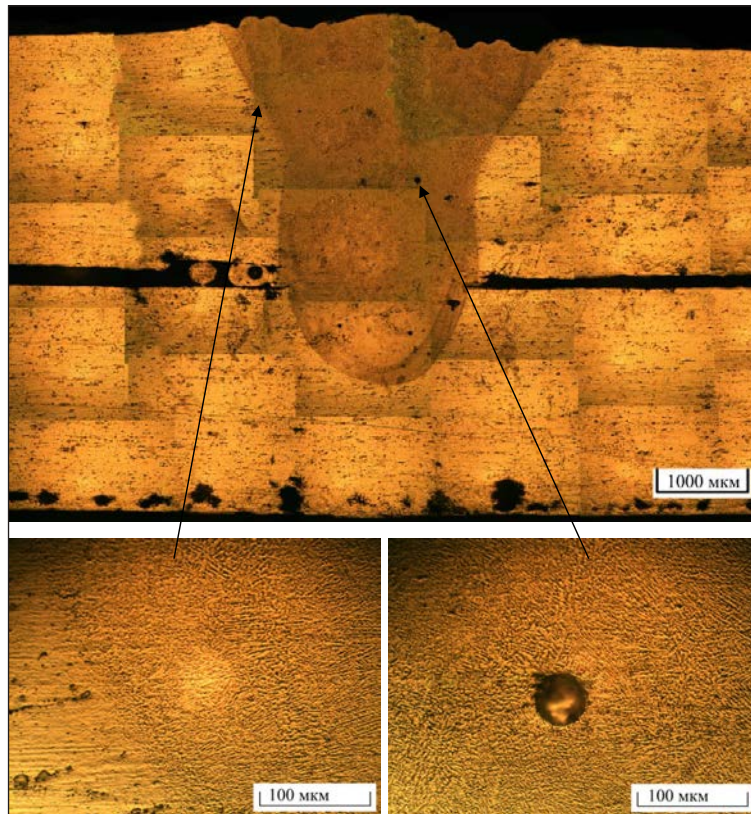


Рис. 1. Структура стикового з'єднання сплаву АМг6М товщиною 2 мм, одержаного лазерним зварюванням у вертикальному просторовому положенні

У результаті проведення випробувань на статичний загин стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 2 мм, одержаних за допомогою лазерного зварювання, встановлено, що кут загику всіх випробуваних зразків перевищує 70° .

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

До стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів, одержаних зварюванням плавленням, висуваються такі вимоги до рівня механічних характеристик [14]: границя міцності зварного з'єднання – не менша за 80% від границі міцності основного металу; відносне подовження $\delta \geq 5\%$, а кут загику $\geq 30^\circ$. Аналіз даних результатів механічних випробувань дозволяє пересвідчитись, що під час лазерного зварювання у вертикальному просторовому положенні на обраному режимі досягаються високі показники механічних характеристик, які повністю задовольняють вимогам, що висуваються до таких зварних з'єднань.

Одержані в ході виконання досліджень результати використані для створення технологічних рекомендацій до виготовлення зварних ребристих панелей для деталей та конструкцій ракетно-космічної техніки з алюмінієвих сплавів.

ВИСНОВКИ

Для забезпечення більш стабільного формування якісного стикового зварного з'єднання з алюмінієвого сплаву АМг6М та запобігання виходу з ладу лазерного устаткування процес зварювання необхідно проводити у вертикальному просторовому положенні «на підйом».

Характерним дефектом у разі лазерного зварювання алюмінієвих сплавів є поодинокі пори та ланцюжки пор, які формуються переважно в кореневій частині шва. Цей дефект може бути ліквідований шляхом досягнення повного провару під час зварювання на підкладці, коли примусово сформований зворотний валик шва, який містить у собі дані дефекти, видаляється шляхом механічної обробки.

REFERENCES

- [1] Toropova, L. S., Eskin, D. G., Kharakterova, M. L., & Dobatkina, T. V. (2017). Advanced aluminum alloys containing scandium: structure and properties. Routledge.
- [2] Monetta, T., Acquesta, A., Maresca, V., Signore, R., Bellucci, F., Di Petta, P., & Lo Masti, M. (2013). Characterization of aluminum alloys environmentally friendly surface treatments for aircraft and aerospace industry. *Surface and Interface Analysis*, 45(10), 1522-1529.

- [3] Santos, M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A., & Ezugwu, E. O. (2016). Machining of aluminum alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9-12), 3067-3080.
- [4] Gould, J. E. (2012). Joining aluminum sheet in the automotive industry – A 30 year history. *Welding Journal*, 91(1).
- [5] Dittrich, D., Standfuss, J., Liebscher, J., Brenner, B., & Beyer, E. (2011). Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design–first results. *Physics Procedia*, 12, 113-122.
- [6] Ilyushenko, R., & Nesterenkov, V. (2006). Novel technique for joining of thick section difficult-to-weld aluminium alloys. *Materials Science Forum*, 519, 1125-1130.
- [7] Krivtsun, I., Reisgen, U., Semenov, O., & Zabirow, A. (2016). Modeling of weld pool phenomena in tungsten inert gas, CO₂-laser and hybrid (TIG+CO₂-laser) welding. *Journal of Laser Applications*, 28(2), 022406.
- [8] Abioye, T.E., Zuhailawati, H., Aizad, S., & Anasyida, A.S. (2019). Geometrical, microstructural and mechanical characterization of pulse laser welded thin sheet 5052-H32 aluminium alloy for aerospace applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(4), 667-679.
- [9] Xiao, R., & Zhang, X. (2014). Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(2), 166-175.
- [10] Lin, R., Wang, H. P., Lu, F., Solomon, J., & Carlson, B. E. (2017). Numerical study of keyhole dynamics and keyhole-induced porosity formation in remote laser welding of Al alloys. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 244-256.
- [11] Oliveira, A. C., Siqueira, R. H. M., Riva, R., & Lima, M. S. F. (2015). One-sided laser beam welding of autogenous T-joints for 6013-T4 aluminium alloy. *Materials & Design*, 65, 726-736.
- [12] Matsunawa, A., Kim, J. D., & Katayama, S. (1997, November). Porosity formation in laser welding–Mechanisms and suppression methods. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Vol. 1997, No. 1, pp. G73-G82). LIA.
- [13] Ola, O. T., & Doern, F. E. (2015). Fusion weldability studies in aerospace AA7075-T651 using high-power continuous wave laser beam techniques. *Materials & Design*, 77, 50-58.
- [14] Ishchenko, A. Ya., & Labur, T. M. (2013). *Svarka sovremennykh konstrukcij iz alyuminievych splavov* [Welding advanced aluminum alloy structures]. Kiev: Naukova dumka. [in Russian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Toropova, L. S. et al. (2017) *Advanced aluminum alloys containing scandium: structure and properties*. Routledge.
- [2] Monetta T. et al. (2013) *Characterization of aluminum alloys environmentally friendly surface treatments for aircraft and aerospace industry*. *Surface and Interface Analysis*. № 45 (10). С. 1522–1529.
- [3] Santos, M. C. et al. (2016) *Machining of aluminum alloys: a review*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. № 86 (9–12). С. 3067–3080.
- [4] Gould, J. E. (2012) *Joining aluminum sheet in the automotive industry – A 30 year history*. *Welding Journal*. № 91 (1).
- [5] Dittrich D. et al. (2011) *Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design–first results*. *Physics Procedia*. № 12. С. 113–122.
- [6] Ilyushenko R., Nesterenkov V. (2006) *Novel technique for joining of thick section difficult-to-weld aluminium alloys*. *Materials Science Forum*. № 519. С. 1125–1130.
- [7] Krivtsun I. et al. (2016) *Modeling of weld pool phenomena in tungsten inert gas, CO₂-laser and hybrid (TIG+ CO₂-laser) welding*. *Journal of Laser Applications*. № 28 (2). 022406.
- [8] Abioye T. E., (2019) *Geometrical, microstructural and mechanical characterization of pulse laser welded thin sheet 5052-H32 aluminium alloy for aerospace applications*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. № 29 (4). С. 667–679.
- [9] Xiao R., Zhang X. (2014) *Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys*. *Journal of Manufacturing Processes*. № 16 (2). С. 166–175.
- [10] Lin R. et al. (2017) *Numerical study of keyhole dynamics and keyhole-induced porosity formation in remote laser welding of Al alloys*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. № 108. С. 244–256.
- [11] Oliveira A. C. et al. (2015) *One-sided laser beam welding of autogenous T-joints for 6013-T4 aluminium alloy*. *Materials & Design* (1980-2015). № 65. С. 726–736.
- [12] Matsunawa A., Kim J. D., Katayama, S. (1997, November) *Porosity formation in laser welding–Mechanisms and suppression methods*. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Vol. 1997. №. 1. Pp. G73–G82). LIA.
- [13] Ola O. T., Doern F. E. (2015) *Fusion weldability studies in aerospace AA7075-T651 using high-power continuous wave laser beam techniques*. *Materials & Design*. № 77. С. 50–58.
- [14] Ищенко А. Я., Лабур Т. М. (2013). *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев : Наукова думка.