

## **АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ НАУКОВОГО ТА ПРАКТИЧНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА**

---

**УДК 621.791.72**

**Бернацький А. В.,**

*bernatskyi@paton.kiev.ua, ORCID ID: 0000-0002-8050-5580,*

*ResearcherID S-7462-2019,*

*к.т.н., старший дослідник, завідувач відділу*

*«Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»,*

*Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ*

**Лукашенко В. А.,**

*z\_lyk@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9685-4654,*

*ResearcherID DDP-7431-2022,*

*к.т.н., науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»,*

*Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ*

**Сіора О. В.,**

*siora\_ov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1927-790X,*

*ResearcherID FYR-4062-2022,*

*науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»,*

*Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ*

**Шамсутдінова Н. О.,**

*shamsutaliia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3525-0080,*

*Scopus ID 57331245800,*

*інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»,*

*Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ*

### **ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ З'ЄДНАНЬ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АА5056**

**Анотація.** При зварюванні алюмінієвих сплавів перевага віддається стиковим з'єднанням. Зварювання стикових з'єднань із повним проплавленням виконують на підкладках, що усуваються, з канавками, у які стікає розплавлений метал разом зі шлаками. Однак існує велике коло промислових задач пов'язаних з необхідністю виготовлення конструкцій із застосуванням таврових зварних з'єднань та внапустку. У зв'язку з цим набуває актуальності вирішення проблеми зварювання таких з'єднань з алюмінієвих сплавів та відпрацювання технологій зварювання, що є метою даної роботи. Виконано відпрацьовування технології лазерного зварювання таврових і внапустку з'єднань алюмінієвого сплаву АА5056 товщиною 2,0 мм та визначені основні технологічні параметри зазначених процесів. З метою запобігання виходу з ладу лазерного обладнання було виконано експерименти з лазерного зварювання при вертикальному положенні швів, а саме зварювання вели «знизу – догори». Згідно ДСТУ EN ISO 15614-11:2016 виконували радіографічний та візуальний контроль одержаних зварних з'єднань, металографічні дослідження, механічні випробування. Рівень якості зварних з'єднань, в залежності від наявності, виду та розмірів дефектів, оцінювали згідно ДСТУ EN ISO 13919-2:2015 «Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 2. Алюміній та його сплави». Визначено особливості формування швів при зварюванні лазерним випромінюванням зварних з'єднань та виконано пошук прогресивних технологічних рішень із метою поліпшення властивостей зварних з'єднань. Визначено ефективність зварювання лазерним випромінюванням для забезпечення надійності таврових та внапустку з'єднань із алюмінієвого сплаву АА5056 при виготовленні зразків товщиною 2,0 мм. Прогнозні при-

*пущення про розвиток об'єкту досліджень – використання одержаних результатів для створення на їх основі технологій лазерного зварювання для застосування в харчовій, машинобудівній, хімічній та інших областях промисловості.*

**Ключові слова:** лазерне зварювання, алюмінієвий сплав, таврові зварні з'єднання, зварні з'єднання внапустку, дефекти, структура.

**Bernatskyi A. V.,**

*bernatskyi@paton.kiev.ua, ORCID ID: 0000-0002-8050-5580,*

*ResearcherID S-7462-2019,*

*Ph.D., Senior Researcher,*

*Head of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding,*

*E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**Lukashenko V. A.,**

*z\_lyk@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9685-4654,*

*ResearcherID DDP-7431-2022,*

*Ph.D., Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding,*

*E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**Siora O. V.,**

*siora\_ov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1927-790X,*

*ResearcherID FYR-4062-2022,*

*Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding,*

*E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**Shamsutdinova N. O.,**

*shamsutaliia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3525-0080,*

*Scopus ID 57331245800,*

*Engineer of the Department the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding,*

*E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

## **LASER WELDING OF AA5056 ALUMINUM ALLOY JOINTS**

**Abstract.** *Butt joints are preferred when welding aluminum alloys. Welding of butt joints with full penetration is performed on removable substrates with grooves into which the molten metal flows together with slag. However, there is a wide range of industrial problems related to the need to manufacture structures using T-weld joints and lap joint. In this regard, solving the problem of welding such joints from aluminum alloys and working out welding technologies, which is the goal of this work, becomes relevant. The laser welding technology of 2.0 mm thick aluminum alloy AA5056 T-weld joints and lap joint was developed and the main technological parameters of the specified welding processes were determined. In order to prevent the failure of the laser equipment, experiments on laser welding were carried out with the vertical position of the seams, namely, the welding was carried out “from the bottom – up”. According to DSTU EN ISO 15614-11:2016, radiographic and visual control of the obtained welded joints, metallographic studies, mechanical tests were performed. The level of quality of welded joints, depending on the presence, type and size of defects, was evaluated according to DSTU EN ISO 13919-2:2015 “Welding. Connections made by electron beam and laser welding. Guidance on assessing the level of quality depending on defects. Part 2. Aluminum and its alloys”. The peculiarities of the formation of seams during welding with laser radiation of welded joints were determined and the search for progressive technological solutions was carried out in order to improve the properties of welded joints. The effectiveness of laser radiation welding to ensure the reliability of T-weld joints and lap joint from AA5056 aluminum alloy in the manufacture of samples with a thickness of 2.0 mm was determined. Predictive assumptions about the development of the object of research – the use of the obtained results for the creation of laser welding technologies based on them for use in the food, machine-building, chemical and other industries.*

**Key words:** laser welding, aluminum alloy, T-weld joint, lap joint, defects, structure.

**JEL Classification:** L 23; O 31; O 32

**DOI:** 10.36477/2522-1221-2023-33-01

**Постановка проблеми.** На даний момент існує стійка тенденція до росту споживання виробів з алюмінію. Область застосування чистого алюмінію – в основному в електротехнічній і харчовій промисловості. Легкі алюмінієві сплави є перспективними конструкційними матеріалами в авіа- та ракетобудуванні, суднобудуванні, хімічній та інших галузях промисловості. У плані реалізації складних конструкційних рішень питання зварювання алюмінієвих сплавів та його якості є дуже важливим, як і в плані відновлення литих виробів з таких матеріалів. У цілому, зварювання алюмінію і його сплавів суттєво відрізняється від зварювання сталей, що обумовлене їхніми різними властивостями.

Алюміній має високу теплопровідність, яка у 5 разів більша за аналогічний показник для сталей. Це приводить до того, що тепло достатньо активно відводиться від місця зварювання в деталях, що з'єднуються. Тому при зварюванні цього металу необхідні набагато більші тепловкладання у порівнянні зі зварюванням сталей. Температура плавлення алюмінію низька порівняно зі сталлю. При нагріванні алюмінієвих сплавів, відбувається різке зниження міцності. Суттєво ускладнює процес і те, що алюміній не міняє при нагріванні колір і не підказує зварювальникові, що метал вже майже нагрітий до температури плавлення. Усі ці специфічні властивості алюмінію підвищують імовірність виникнення таких дефектів як прожоги. Також алюміній має у порівнянні зі сталями вдвічі більшу ливарну усадку, внаслідок чого, при затвердінні металу зварювальної ванни в ньому розвиваються значні внутрішні напруження, які нерідко приводять до утворення багатьох дефектів, у тому числі гарячих тріщин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для одержання нероз'ємних з'єднань алюмінієвих конструкцій широко застосовується зварювання [1–3]. Одне з перших місць на сьогодні займають технології дугового зварювання [4–6]. Так, при виготовленні конструкцій з сучасних алюмінієвих сплавів (таких, як АМг6, 1420, 1201, 1460, 1925, В96Ц) найбільш широко використовуються два способи дугового зварювання – плавким і неплавким електродом. Вони дозволяють одержувати порівняно високі рівні міцності й пластичності швів і забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики зварених з'єднань. Проведені авторами роботи [7] дослідження показали, що межа міцності зварених з'єднань сучасних алюмінієвих сплавів основних систем легування, отриманих дуговим

зварюванням плавким електродом, на 1...16% вища, ніж у з'єднань, виконаних неплавким електродом. У той же час пластичні властивості зварених з'єднань (ударна в'язкість металу швів й кут загины з'єднань) вищі при зварюванні неплавким електродом. Переваги застосування процесу МІГ зростають зі збільшенням товщини металу, що зварюється. Так, на сплавах 1420 і 1460 при товщині листів 3...4 мм переваги МІГ процесу становлять 1...2,5%, а при товщині листів 6 мм – 5...9%. Застосування зварювальних дротів, легованих скандієм, при дугових способах зварювання алюмінієвих сплавів дозволяє підвищити механічні властивості металу швів і зварених з'єднань у цілому. Ступінь зміцнення швів у результаті введення скандію залежить від хімічного складу сплаву, товщини листів і структури литого металу швів, у той же час приводить до зменшення ударної в'язкості металу швів і кута загины зварених з'єднань.

Але останнім часом на зміну вказаним дуговим технологіям зварювання приходять альтернативні. Все більш поширюється в світі лазерне зварювання алюмінієвих сплавів. Технологічним проривом можна вважати початок промислового застосування лазерного зварювання алюмінієвих сплавів в автобудуванні й авіабудуванні, що відбувся у 1990-і роки [8–10]. Аналіз цих джерел показує, що у застосуванні до виготовлення тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів зварюванню концентрованими потоками енергії, такими, як пучок електронів та випромінювання лазера, сучасні дослідники віддають перевагу перед дуговими способами (аргоно-дуговим і плазмовим зварюванням). У тому числі тому що при мінімальних значеннях питомої погонної енергії, лазерне зварювання дозволяє одержати шви кинджальної форми, що обумовлює зменшення поперечних деформацій стикових з'єднань.

Локальність впливу і висока густина потужності сфокусованого лазерного випромінювання, широкі межі її регулювання, мінімальні розміри ЗТВ, відсутність електричного впливу на оброблювальні матеріали, можливість прецизійного наведення сфокусованого лазерного випромінювання на місце зварювання, мінімальні залишкові деформації – все це створює широкі перспективи застосування лазерного зварювання при виготовленні тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів [11–13].

**Постановка завдання.** При зварюванні алюмінієвих сплавів перевага віддається стиковим з'єднанням. Зварювання стикових з'єднань

із повним проплавленням виконують на підкладках, що усуваються, з канавками, у які стікає розплавлений метал разом зі шлаками. Однак існує велике коло промислових задач пов'язаних з необхідністю виготовлення конструкцій із застосуванням таврових зварних з'єднань та внапустку. У зв'язку з цим набуває актуальності вирішення проблеми зварювання таких з'єднань з алюмінієвих сплавів та відпрацювання технологій зварювання, що є метою даної роботи.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Виконано відпрацювання технології лазерного зварювання таврових і внапустку з'єднань алюмінієвого сплаву AA5056 товщиною 2,0 мм та визначені основні технологічні параметри зазначених процесів. Хімічний склад алюмінієвого сплаву AA5056 (Al 91,9–94,68; Mg 4,8–5,8; Fe до 0,5%; Mn 0,3–0,8%; Si до 0,5%; Zn до 0,2; Cu до 0,1; Ti 0,02–0,1%; Be 0,0002–0,005).

Параметри технологічних режимів лазерного зварювання змінювали у наступних межах: потужність лазерного випромінювання  $P = 2,0 \dots 4,4$  кВт; швидкість зварювання  $V = 500 \dots 5000$  мм/хв; величина розфокусування  $\Delta F \pm 5$  мм; витрати захисного газу (аргону) 5,0...20,0 л/хв.

Габаритні розміри дослідних зразків вибирали у відповідності до ДСТУ EN ISO 15614-11:2016 «Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 11. Електронно-променеве та лазерно-променеве зварювання».

Для проведення експериментальних досліджень процесу лазерного зварювання, використовували твердотільний лазер DY 044 (виробництва компанії «ROFIN-SINAR», Німеччина). Для фокусування лазерного випромінювання використовували оптичну систему з кварцевою лінзою з фокусною відстанню  $F=300$  мм. Для захисту зварювальної ванни використовували гелій марки «А». Для захисту кореню шва та остигаючого металу використовували аргон надчистий.

З метою запобігання виходу з ладу лазерного обладнання було виконано експерименти з лазерного зварювання при вертикальному положенні швів, а саме зварювання вели «знизу – догори».

Згідно ДСТУ EN ISO 15614-11:2016 виконували радіографічний та візуальний контроль таврових зварних з'єднань та зварних з'єднань внапустку. Якість зварних з'єднань, в залежності від наявності, виду та розмірів дефектів, оцінювали згідно ДСТУ EN ISO 13919-2:2015 «Зварювання. З'єднання, виконані електронно-промене-

вим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 2. Алюміній та його сплави».

Візуальний контроль здійснювався на попередньо механічно очищених від забруднень зразках. Під час проведення візуального контролю використовувалося комбіноване (денний + місцеве за допомогою лампи розжарювання) освітлення – близько 1000 лк. Були використані наступні пристосування і інструменти: лупи переглядові 4\* і 10\* крат, лупа вимірювальна 10\* крат з точністю 0,1 мм, штангенциркуль ШЦ140 (кл. 2), лінійка, вимірювач-профіломер портативний годинного типу з точністю 0,01 мм, мікроскоп портативний, люксметр Ю-116. За результатами візуального контролю оцінювалося: ширина шва; лускатість; наявність кратерів (усадовчих раковин в кратері); корінь шва і інші параметри.

Радіографічний контроль здійснювався на попередньо механічно очищених від забруднень зразках. Були використані: рентгенівський апарат – РАП 150/300; еталон чутливості – дровтовий; плівка радіографічна – AGFA-D5, розмір 240×100 мм та 240×300 мм; металеві екрани, що підсилюють – Рb-0,027. Виконувався порівняльний аналіз окремих результатів радіографічного контролю (результати підрахунку сумарної площини виявлених пор; їх взаємного розташування; їх розміру та інших факторів, що впливають на оцінку рівня якості зварного з'єднання).

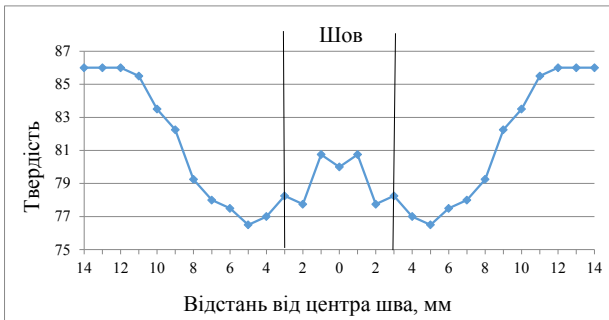
Оптичну мікроскопію темплетів зразків зварних з'єднань виконували за допомогою мікроскопу «МІМ-8». Твердість вимірювали на приборі твердомір «Wilson Rockwell 4JR Hardness Tester».

Випробування на розтяг основного матеріалу сталі 12X18H10T товщиною 1,5 мм, проводили відповідно до ГОСТ 6996-66 «Зварні з'єднання. Методи визначення механічних властивостей» на універсальній сервогідравлічній машині «MTS-318.25», в нормальних умовах ( $t=20^{\circ}\text{C}$ ). Швидкість переміщення захвату 10 мм/хв. За результатами механічних проведення випробувань отримані експериментальні данні зусилля руйнування ( $P_{\text{max}}$ ).

Встановлено, що для таврових з'єднань при лазерному зварюванні (виконується за два проходи) найкращі результати стосовно стабільності процесу та утворення щільних швів були отримані при використанні режиму: потужність лазерного випромінювання  $P_{\text{л}} = 4$  кВт; величина розфокусування (заглиблення фокусу)  $\Delta F = -1$  мм; швидкість зварювання  $V_{3В} = 3,0$  м/хв. Виконання зварювання на вказаних режимах дозволяє



**а**



**б**

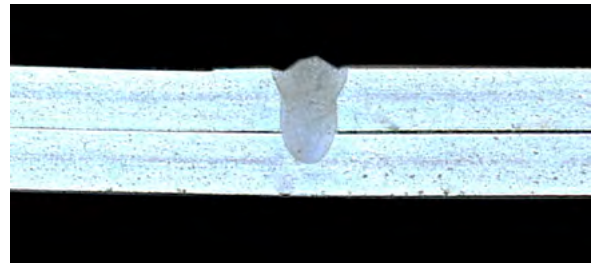
**Рис. 1. Макроструктура (а) таврового з'єднання та розподіл твердості (б) сплаву AA5056**

одержати таврове зварне з'єднання, що відповідає рівню якості «С» згідно ISO 13919-2.

При зварюванні таврового з'єднання лазерним випромінюванням спостерігається перекриття двох швів (рис. 1а). Спрямованість дендритів в металі обох швів аналогічна стиковому з'єднанню, спостерігаються окремі пори розміром до 200 мкм, розташовані на границі сплавлення металу двох швів. На тавровому з'єднанні в деяких ділянках ЗТВ також спостерігаються пори розміром до 30 мкм. Причиною їх утворення може бути підвищений вміст газів у вихідному металі та двократне нагрівання металу в цій зоні. Твердість металу шва становить 78–81 HRB, у ЗТВ падає до 76 HRB (рис. 1.б). Твердість сплаву AA5056 перед зварюванням становила 83–85 HRB.

За результатами проведення механічних випробувань встановлено, що отримані експериментальні данні зусилля руйнування таврового з'єднання становлять 15995–16405 Н, що перевищує значення зусилля руйнування основного матеріалу сплаву AA5056, які становлять 9490–10142 Н.

Для з'єднань внапустку при лазерному зварюванні найкращі результати стосовно стабільності процесу та утворення щільних швів були отримані при використанні режиму: потужність лазерного випромінювання  $P_{\text{л}} = 4$  кВт; величина розфокусування (заглиблення фокусу)  $\Delta F = -1$  мм;



**а**



**б**

**Рис. 2. Макроструктура (а) та розподіл твердості (б) у напустковому з'єднанні сплаву AA5056**

швидкість зварювання  $V_{\text{зв}} = 3,8$  м/хв. Виконання зварювання на вказаних режимах дозволяє одержати напусткове зварне з'єднання, що відповідає рівню якості «С» згідно ISO 13919-2.

В ході проведення випробувань отримані експериментальні данні зусилля руйнування ( $P_{\text{max}}$ ).

При зварюванні напусткового зварного з'єднання спостерігається неповне проплавлення нижнього зразка (рис. 2а). Характерною особливістю з'єднань є одиничні пори діаметром від 100 мкм до 600 мкм у нижній частині шва. Ширина ЗТВ менша у порівнянні із тавровим з'єднанням і складає 5 мм, що пов'язано із тим, що зварювання проводилось в 1 прохід. Твердість металу шва становить 79 – 81 HRB, у ЗТВ падає до 77 HRB (рис. 2б).

За результатами проведення механічних випробувань на одноосьовий статичний розтяг встановлено, що отримані експериментальні данні зусилля руйнування напусткового з'єднання становлять 6065–6903 Н, що на 30–40% нижче значення зусилля руйнування основного матеріалу сплаву AA5056, які становлять 9490–10142 Н. Це може бути пов'язано з декілька факторами, до яких належать наступні. У першу чергу з геометричною складовою, а саме шириною зварного з'єднання, яка на 20-40% менше товщини зразків, що зварюються. А також з відносно великою кількістю одиничних пор

та ланцюжками пор, виявлених у шві зварного з'єднання за результатами радіографічного контролю. Що також впливає на загальні розміри площі зварного з'єднання та такі його механічні характеристики, як міцність.

З метою запобігання утворення дефектів у вигляді пор, виконано пошук прогресивних технологічних рішень поліпшення властивостей зварних з'єднань. А саме: проведені дослідження із використання різних видів інертних газів (аргону та гелію) для захисту окремих ділянок зварного з'єднання при різних тисках газів (для захисту зварювальної ванни; захисту «хвостової» частини ванни та остигаючого металу). Найкращі результати, стосовно зниження кількості пор та якісного формування геометрії зварних з'єднань, одержано при коаксіальній подачі гелію для захисту верхньої частини шва. Для економії витрат можливе застосування для захисту верхньої частини ванни аргону при його подачі спереду назад за ходом зварювання.

**Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі.** За результатами радіографічного аналізу та візуального контролю, металографічних досліджень та механічних випробувань, визначено режими лазерного зварювання таврових зварних з'єднань та з'єднань внапустку алюмінієвого сплаву AA5056 товщиною 2 мм, якість яких відповідає рівню якості «С» згідно вимог ISO 13919-2.

Встановлено, що верхню частину зварювальної ванни доцільно захищати гелієм при його коаксіальній подачі. Можливий захист верхньої частини ванни аргонном при його подачі спереду назад за ходом зварювання.

Перспективними для подальшої розробки технологіями зварювання алюмінієвих сплавів на думку авторів є такі, що базуються на гібридному способі зварювання при використанні лазерного випромінювання одночасно з дугою плавкого електроду.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Wang G. Q., Zhao Y. H., Tang Y. Y. Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2020. Т. 33. С. 13–29. URL: <https://doi.org/10.1007/s40195-019-00946-8>
2. Cao L., Zhou Q., Liu H., Li J., Wang S. Mechanism investigation of the influence of the magnetic field on the molten pool behavior during laser welding of aluminum alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Т. 162. С. 120390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120390>

3. Huang M., Zhang Q., Qi L., Deng L., Li Y. Effect of external magnetic field on resistance spot welding of aluminum alloy AA6061-T6. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Т. 50. С. 456–466. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.005>

4. Sokoluk M., Cao C., Pan S., Li X. Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075. *Nature communications*. 2019. Т. 10. № 1. С. 98. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07989-y>

5. Zhang Z., Wen G., Chen S. Weld image deep learning-based on-line defects detection using convolutional neural networks for Al alloy in robotic arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Т. 45. С. 208–216. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.06.023>

6. Huang Y., Yuan Y., Yang L., Wu D., Chen S. Real-time monitoring and control of porosity defects during arc welding of aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Т. 286. С. 116832. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116832>

7. Машин В. С., Покляцкий А. Г., Федорчук В. Е. Механические свойства соединений алюминевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*. 2005. № 9. С. 43–49.

8. Katayama S., Katayama S. Industrial applications of laser or hybrid welding. *Fundamentals and Details of Laser Welding*. 2020. С. 185–198. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7933-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7933-2_10)

9. Rajan R., Kah P., Mvola B., Martikainen J. Trends in aluminium alloy development and their joining methods. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2016. Т. 44. № 4. С. 383–397.

10. Oladimeji O. O., Taban E. Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys. *Welding in the World*. 2016. Т. 60. С. 415–457. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0317-9>

11. Löveborn D., Larsson J. K., Persson K. A. Weldability of aluminium alloys for automotive applications. *Physics Procedia*. 2017. Т. 89. С. 89–99. URL: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.08.011>

#### REFERENCES:

1. Wang, G. Q., Zhao, Y. H., Tang, Y. Y. (2020). 'Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review', *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33, pp. 13–29. URL: <https://doi.org/10.1007/s40195-019-00946-8>
2. Cao, L., Zhou, Q., Liu, H., Li, J., Wang, S. (2020). 'Mechanism investigation of the influence of the magnetic field on the molten pool behavior during laser welding of aluminum alloy. International', *Journal of Heat and Mass Transfer*, 162, pp. 120390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120390>
3. Huang, M., Zhang, Q., Qi, L., Deng, L., Li, Y. (2020). 'Effect of external magnetic field on resistance

spot welding of aluminum alloy AA6061-T6', *Journal of Manufacturing Processes*, 50, pp. 456–466. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.005>

4. Sokoluk, M., Cao, C., Pan, S., & Li, X. (2019). 'Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075', *Nature communications*, 10(1), pp. 98. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07989-y>

5. Zhang, Z., Wen, G., Chen, S. (2019). 'Weld image deep learning-based on-line defects detection using convolutional neural networks for Al alloy in robotic arc welding', *Journal of Manufacturing Processes*, 45, pp. 208–216. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.06.023>

6. Huang, Y., Yuan, Y., Yang, L., Wu, D., Chen, S. (2020). 'Real-time monitoring and control of porosity defects during arc welding of aluminum alloys', *Journal of Materials Processing Technology*, 286, pp. 116832. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116832>

7. Mashin, V. S., Poklyackij, A. G., Fedorchuk, V. Ye. (2005). 'Mekhanicheskie svojstva soedinenij aly-

uminievyh splavov pri svarke plavyashchimsya i neplavyashchimsya elektrodom', *Avtomaticheskaya svarka*, (9), pp. 43–49.

8. Katayama, S., Katayama, S. (2020). Industrial applications of laser or hybrid welding. *Fundamentals and Details of Laser Welding*, pp. 185–198. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7933-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7933-2_10)

9. Rajan, R., Kah, P., Mvola, B., Martikainen, J. (2016). 'Trends in aluminium alloy development and their joining methods', *Reviews on Advanced Materials Science*, 44(4), pp. 383–397.

10. Oladimeji, O. O., Taban, E. (2016). 'Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys', *Welding in the World*, 60, pp. 415–457. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0317-9>

11. Löveborn, D., Larsson, J. K., Persson, K. A. (2017). 'Weldability of aluminium alloys for automotive applications', *Physics Procedia*, 89, pp. 89–99. URL: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.08.011>

*Стаття надійшла до редакції 1 березня 2023 року*