

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ТОВАРОЗНАВСТВА

УДК 621.791.72

Бернацький А. В.,

*bernatskyi@paton.kiev.ua, ORCID ID: 0000-0002-8050-5580, Researcher ID: 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_luk@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9685-4654, Researcher ID: 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, Researcher ID: 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 ВИСОКОЛЕГОВАНОЇ ЖАРОМІЦНОЇ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ АУСТЕНІТНОГО КЛАСУ 12X18H10T

Анотація. Метою даної роботи, є дослідження впливу зміни технологічних параметрів лазерного зварювання тонкостінних стикових з'єднань високолегованої жароміцної корозійностійкої сталі аустенітного класу 12X18H10T, на геометрію, структуру та властивості зварних з'єднань. Розроблено технологію та обладнання для лазерного зварювання тонкостінних труб з нержавіючих сталей для виготовлення багатошарових сільфонів, які проводять або поділяють рідкі або газоподібні середовища, у тому числі агресивні. За традиційною технологією сільфон виготовлявся шляхом аргоннодугового зварювання тонкостінної труби з одного листа товщиною 0,5...2,0 мм, з подальшим гідроформуванням. За розробленою технологією сільфон складається з декількох тонкостінних труб (від 3 до 10 шарів) завтовшки 0, мм кожна, зварених лазерним випромінюванням. У цій багатошаровій конструкції сільфона, навіть якщо одне з зварних з'єднань виявиться дефектним або вийде з ладу в процесі експлуатації, сам сільфон все одно буде працездатним. Аналіз результатів технологічних досліджень і механічних випробувань показав, що відповідні технічним вимогам з'єднання тонколистової високолегованої жароміцної корозійностійкої сталі аустенітного класу 12X18H10T, мають максимальну міцність у разі їх зварювання лазерним випромінюванням потужністю 45...70 Вт зі швидкістю 10...18 мм/с та застосуванням газового захисту зони зварювальної ванни та остигаючого металу шва з обох сторін зварного з'єднання. Оптимальний діапазон погонної енергії зварювання знаходиться в межах 4...6 Дж/мм. Завдяки застосування багатошарової конструкції звареної лазерним випромінюванням, знижено кількість браку з 50 % при аргонно-дуговому зварюванні, до 0,5 % при лазерному зварюванні. Підвищено продуктивність роботи у 4 рази. Циклічна міцність, корозійна стійкість та інші характеристики багатошарового сільфона, вище за характеристики одношарового сільфона, звареного аргонно-дуговим зварюванням в 1,5...4 рази (залежно від кількості шарів і розмірів сільфонів). Розробку успішно впроваджено на двох підприємства м. Києва, а саме на ТОВ «Арматом» та ПрАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування».

Ключові слова: лазерне зварювання, високолегована жароміцна корозійностійка сталь аустенітного класу, тонкостінні труби, стикові зварні з'єднання, технологічні режими, структура, механічні властивості.

Bernatskyi A. V.,

bernatskyi@paton.kiev.ua, ORCID ID: 0000-0002-8050-5580, Researcher ID: 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, Researcher ID: 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, Researcher ID: 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 HIGH-ALLOYED CORROSION-RESISTANT AUSTENITE CLASS STEEL 12KH18N10T

Abstract. *The purpose of this work is to study the effect of changing the technological parameters of laser welding of thin-walled butt joints of highly alloyed heat-resistant corrosion-resistant steel of the austenitic class 12Kh18N10T on the geometry, structure and properties of welded joints. The technology and equipment for laser welding of thin-walled stainless steel pipes for the production of multilayer bellows, which conduct or divide liquid or gaseous media, including aggressive ones, have been developed. According to the traditional technology, the bellows was made by argon arc welding of a thin-walled pipe from one sheet with a thickness of 0.5...2.0 mm, followed by hydroforming. According to the developed technology, the bellows consists of several thin-walled tubes (from 3 to 10 layers) each 0.2 mm thick, welded by laser radiation. In this multilayer design of the bellows, even if one of the welded joints turns out to be defective or fails during operation, the bellows itself will still be functional. The analysis of the results of technological research and mechanical tests showed that the connections of thin-sheet highly alloyed high-alloy heat-resistant corrosion-resistant steel of the austenitic class 12Kh18N10T, which meet the technical requirements, have maximum strength in the case of welding with laser radiation with a power of 45...70 W at a speed of 10...18 mm/s and using gas protection of the weld pool area and cooling weld metal on both sides of the welded joint. The optimal range of linear welding energy is within 4...6 J/mm. Thanks to the use of a multilayer structure welded by laser radiation, the number of defects has been reduced from 50% in argon-arc welding to 0.5 % in laser welding. Work productivity has increased by 4 times. Cyclic strength, corrosion resistance and other characteristics of a multilayer bellows are higher than the characteristics of a single-layer bellows welded by argon-arc welding by 1.5...4.0 times (depending on the number of layers and sizes of bellows). The development was successfully implemented at two enterprises in Kyiv, namely "Armatom" LLC and "Kyiv Central Design Bureau of Armature Construction".*

Key words: laser welding, highly alloyed heat-resistant corrosion-resistant steel of the austenitic class, thin-walled pipes, butt-welded joints, technological modes, structure, mechanical properties.

JEL Classification: L 23; O 31; O 32

DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-32-01>

Постановка проблеми. Розвиток таких пріоритетних галузей промисловості, як харчова, хімічна, ракетно-космічна, медична, приладобудування та інших, зумовлює постійно зростаючу

потребу у високоякісних конструкціях, що включають прецизійні трубчасті вироби малих розмірів [2, 6, 10]. В даний час серед трубчастих виробів, що виготовляються з широкого спектру матеріалів,

часто зустрічаються такі, зовнішній діаметр яких лежить в межах від 1,0 до 100 мм при товщині стінки 0,1...1,0 мм. Одним з ключових аспектів, що дозволяють забезпечити необхідну продуктивність процесу і якість одержуваного нероз'ємного з'єднання таких тонкостінних трубчастих виробів, є вибір способу їх виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зварювання прямошовних труб є одним з найбільш розповсюджених методів одержання таких виробів. Для виготовлення тонкостінних труб з листових заготовок використовують процес зварювання, яке може здійснюватися із використанням ТІГ [6], мікроплазмового [7, 8], лазерного способу [1, 5, 9, 11], або гібридного чи комбінованого зварювання [3, 4].

Розглянуті дослідження, виконані різними авторами свідчать, що вибір способу зварювання є актуальним завданням для таких відповідальних тонкостінних конструкцій. Оскільки від правильності вибору технології виготовлення залежать геометрія зварного з'єднання, його структура, механічні та інші властивості.

Дослідження присвячені лазерному способу зварювання [1, 5, 9, 11], показують, що для усунення мікрodefektів і підвищення якості зварного шва при лазерному зварюванні стикових швів тонкостінних деталей, доцільно вести процес у «теплопровідному режимі проплавлення» з утворенням зони проплавлення, ширина якої перевищує товщину зварюваних крайок у 4...6 разів. Це продиктовано насамперед необхідністю зниження вимог до збирання заготовок під зварювання та полегшення процесу суміщення сфокусованого лазерного випромінювання з місцем стиковки крайок заготовок.

За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що дослідження присвячені оцінці властивостей тонкостінних стикових зварних з'єднань з високолегованих жароміцних корозійностійких сталей аустенітного класу виконаних зварюванням лазерним випромінюванням, знаходяться на стадії наукового вишукування.

Постановка завдання. Актуальним завданням, яке стало метою даної роботи, є дослідження впливу зміни технологічних параметрів лазерного зварювання тонкостінних стикових з'єднань високолегованої жароміцної корозійностійкої сталі аустенітного класу 12X18H10T, на геометрію, структуру та властивості зварних з'єднань.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для виготовлення зварних тонкостінних труб використовували лазерне зварювання стикових з'єднань з холоднокатаної стрічки товщиною 0,2 мм, виготовленої з високолегованої жаро-

міцної корозійностійкої сталі аустенітного класу 12X18H10T.

Одним з важливих факторів при вирішенні будь-якої технологічної задачі є правильний вибір відповідного обладнання. При виборі типу лазера для зварювання тонкостінних труб було враховано цілий комплекс параметрів, таких як потужність лазерного випромінювання, її втрати внаслідок відображення від зварюваних поверхонь, розбіжність лазерного випромінювання, ККД і т.п. До головних переваг волоконних лазерів відносять значний обсяг резонатора у поєднанні із забезпеченням його надійного охолодження, що підвищує не тільки ККД, а й термостійкість матеріалу робочого середовища. При цьому такі лазери мають вельми компактні розміри для приладів подібного класу потужності та якості генерованого випромінювання. За критеріями компактності, надійності та величини ККД волоконні лазери перевершують діодні та Nd:YAG-лазери. Крім цього, в порівнянні з CO₂-лазерами, волоконні мають всі зручності передачі випромінювання по оптичному волокну і більш економічні в експлуатації. Зазначені переваги волоконних лазерів сприяли вибору лазера такого типу для проведення подальших експериментів.

Зварювання трубчастих заготовок із стрічки проводили за допомогою трикоординатного лазерного комплексу «АРМА-100М», створеного в ІЕЗ ім. Є. О. Патона та оснащеного ітербієвим волоконним одномодовим лазером «YLR-100-AC» (фірми «IPG Laser», Німеччина) з потужністю випромінювання 100 Вт. Зовнішній вигляд комплексу «АРМА-100М» для лазерного зварювання показаний на рис. 1. До геометрії зварних швів пред'являли такі вимоги, як вертикальність лінії сплавлення, відсутність прожогів, напливів і провисань.



Рис. 1. Зовнішній вигляд зварювального комплексу «АРМА-100М»

З метою попереднього визначення параметрів режиму зварювання експерименти проводили шляхом виконання проплавлень у плоских листових зразках, а також зварювання стикових зварних з'єднань. Зразки вирізали ножицями гільйотини («Schroeder Maschinenbau», Німеччина). Лазерне випромінювання фокусували на поверхню зразка в пляму діаметром 40 мкм. Потужність випромінювання P змінювали від 30 до 100 Вт, а швидкість зварювання V від 10,0 до 18,0 мм/с. Остаточні параметри режиму вибирали шляхом зварювання трубних заготовок у спеціально розробленому пристосуванні, що забезпечує мінімальну (до 0,01 мм) депланацію кромок. Застосування мідних елементів у конструкції всіх зварювальних струбцин забезпечило однакову геометрію одержуваних зварних з'єднань як у попередніх, так і в завершальних експериментах.

Крім таких основних параметрів, як потужність та швидкість, на якість зварювання впливають і деякі допоміжні параметри процесу. Насамперед це стосується методів захисту шва від окислення. У нашому випадку застосовували захист зварювальної ванни інертними газами з верхньої та нижньої сторін зварюваного зразка.

Специфіка лазерного зварювання обумовлює застосування спеціальних сопел і складів захисних газів, що забезпечують як надійний захист, так і ефективно проплавлення. Функцію захисту зварного шва від окислення можуть виконувати різні гази. Однак внаслідок різниці у фізичних властивостях ці гази надають різний вплив на ефективність проплавлення шляхом сприяння виникненню над зварювальною ванною плазмового факела, що екранує лазерне випромінювання. Гази, що мають більш високий потенціал іонізації та теплопровідність, забезпечують найбільшу ефективність проплавлення [10].

Проведені експерименти показали, що у разі застосування аргону або гелію як захисний газ над зварювальною ванною утворюється плазмовий факел, що частково поглинає і розсіює лазерне випромінювання. Частка поглиненого випромінювання прямо пропорційна потенціалу іонізації захисного газу. Так, при використанні аргону (потенціал іонізації 15,7 еВ) спостерігається значне поглинання та перефокусування випромінювання за рахунок утворення так званої «плазмової лінзи». В результаті цього глибина провару зменшується в кілька разів. Одним із способів усунення даного ефекту є застосування як захисний газ гелію (потенціал іонізації 24,6 еВ).

Також на якість захисту значною мірою впливає правильний вибір витрати газу. На підставі експериментальних даних були отримані наступні діапазони витрати деяких захисних газів та їх сумішей: He – $(50...60) \times 10^{-5}$ м³/с; 50% He + 50% Ar – $(45...55) \times 10^{-5}$ м³/с; Ar – $(15...20) \times 10^{-5}$ м³/с.

Металографічні дослідження проводили на вирізаних із зварних сполук і відполірованих зразках, протруєних електролітичним способом в 20 % розчині хромової кислоти. Для оптичної мікроскопії застосовували мікроскоп «Versamet-2» («Unitron», США). Мікротвердість HV вимірювали на мікротвердомірі М-400 («Лесо», США) при навантаженні 100 г. Кількість фериту визначалася за допомогою феритометра «Ferritgehaltmesser 1,053» (Німеччина).

Металографічні дослідження шліфів зварних з'єднань дозволили встановити, що у структура шва аустенітна, як й структура основного металу. У структурі основного металу слід відзначити ланцюжки неметалевих включень, ймовірно нітридів і карбонітридів, розташованих уздовж напрямку прокату. У центрі шва формується зона рівноосних кристалітів, але в краю литої зони утворюються стовпчасті кристаліти, мають витягнуту форму. Лінії сплавлення практично вертикальні, відсутні напливи та провисання.

Твердість металу шва незначно (на 12...18 %) підвищується, в порівнянні з основним металом. Так, за твердості основного металу HV01–156...165, твердість шва у центральній частині – HV01–176...193, а ЗТВ – HV01–165...181. Зі збільшенням потужності лазерного випромінювання підвищується вміст феритної фази від 0 % в основному металі до 0,15% у металі шва. Фотографії макро- та мікроструктури характерних ділянок зварного шва на зразку із сталі 12X18H10T 12X18H10T ($\delta=0,2$ мм), отриманому при $P=50$ Вт та $V=10$ мм/с, показано на рис. 2-4.

Межа міцності та відносно подовження зварених лазерним способом зразків вимірювали за допомогою розривної машини «FP10/1». У таблиці 1 показані результати випробувань зварних з'єднань на розрив.



Рис. 2. Структура зварного шва, виконаного у зразку з високолегованої жароміцної корозійностійкої сталі аустенітного класу 12X18H10T ($\delta=0,2$ мм) при $P=50$ Вт та $V=10$ мм/с, $\times 100$

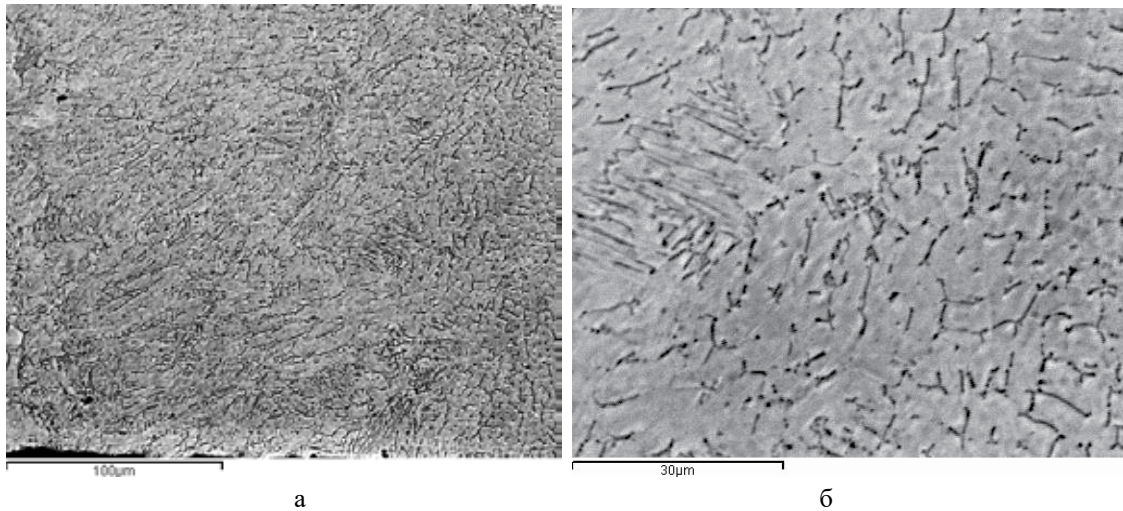


Рис. 3. Структури металу в середній частині зварного шва, виконаного у зразку із високолегованої жароміцної корозійностійкої аустенітної сталі 12Х18Н10Т ($\delta=0,20$ мм) при $P=50$ Вт та $V=10$ мм/с, а) – $\times 300$; б) – $\times 1000$

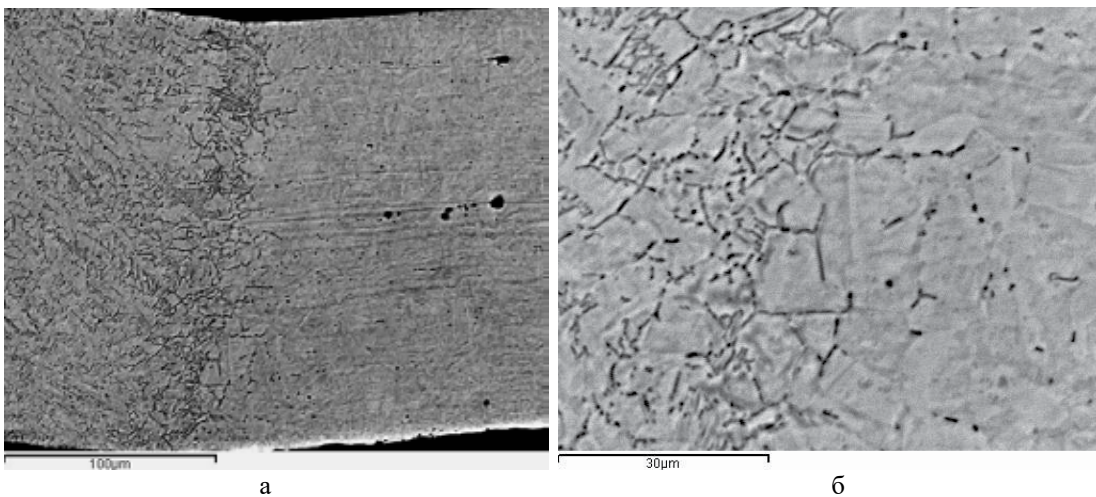


Рис. 4. Структури металу в зоні сплавлення, отриманої при зварюванні зразку із високолегованої жароміцної корозійностійкої сталі аустенітного класу 12Х18Н10Т ($\delta=0,2$ мм) з $P=50$ Вт та $V=10$ мм/с, а) – $\times 300$; б) – $\times 1000$

Таблиця 1

Характеристики міцності стикових зварних з'єднань високолегованої жароміцної корозійностійкої сталі аустенітного класу 12Х18Н10Т ($\delta=0,2$ мм), отриманих при різних режимах лазерного зварювання в захисних газах.

Показники	Значення для основного металу	Значення за технічними вимогами	№ зразка						
			1	2	3	4	5	6	
			Захисний газ			Захисний газ			
			Гелій			Аргон			
Потужність лазерного випромінювання, Вт	-	-	70	45	60	65	50	60	
Швидкість зварювання, мм/с	-	-	18,0	10,0	12,5	16,5	10,0	12,5	
Механічні характеристики	Зусилля розриву, МН	63,6	і	65,8	81,6	86,7	45	57,3	60
	Відносне подовження, %	32,4	і	25	25	28	12,5	16,3	22

При виконанні цих з'єднань нижню сторону шва завжди захищали аргоном, а верхню – як аргоном, так і гелієм. Порівняння результатів випробувань показало, що відповідні технічним вимогам з'єднання були отримані при потужності лазерного пучка 45...70 Вт і швидкості зварювання від 10 до 18 мм/с. Таким чином, визначальним параметром, що впливає на якість зварного з'єднання, можна вважати погонну енергію. У нашому випадку оптимальний діапазон цього параметра лежить в межах 4...6 Дж/мм.

Розроблену технологію лазерного зварювання тонкостінних трубних заготовок для виготовлення багатошарових сільфонів успішно впроваджено на двох підприємства м. Києва, а саме на ТОВ «Арматом» та ПрАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування». Багатошарові сільфони, виготовлені за розробленою технологією, забезпечують абсолютну герметичність при високому тиску та температурі у поєднанні з чудовою гнучкістю, що особливо актуально в умовах шкідливих та небезпечних виробництв.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Аналіз результатів технологічних досліджень і механічних випробувань показав, що відповідні технічним вимогам з'єднання тонколистової високолегованої жароміцної корозійностійкої сталі аустенітного класу 12X18H10T, мають максимальну міцність у разі їх зварювання лазерним випромінюванням потужністю 45...70 Вт зі швидкістю 10...18 мм/с та застосуванням газового захисту зони зварювальної ванни та остигаючого металу шва з обох сторін зварного з'єднання. Оптимальний діапазон погонної енергії зварювання знаходиться в межах 4...6 Дж/мм. Завдяки застосування багатошарової конструкції звареної лазерним випромінюванням, знижено кількість браку з 50 % при аргонно-дуговому зварюванні, до 0,5 % при лазерному зварюванні. Підвищено продуктивність роботи у 4 рази. Циклічна міцність, корозійна стійкість та інші характеристики багатошарового сільфона, вище за характеристики одношарового сільфона, звареного аргонно-дуговим зварюванням в 1,5...4 рази (залежно від кількості шарів і розмірів сільфонів).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Celen S., Karadeniz S., Ozden H. Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2008. Т. 39. № 11. С. 845-850.

2. Huang X., et al. Analysis of three-roller continuous and synchronous calibration process of straightness and ovality for large thin-walled pipes considering the weld. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Т. 121. № 9. С. 5957-5969. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09656-5>

3. Khaskin V. Yu., et al. Features of synergistic effect manifestation in laser-plasma welding of SUS304 steel, using disc laser radiation. *The Paton Welding Journal*. 2020. № 4. С. 29-33. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.04.04>

4. Krivtsun I. V., Bushma A. I., Khaskin V. Yu. Hybrid laser-plasma welding of stainless steels. *The Paton Welding Journal*. 2013. № 3. С. 46-50. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2013/pdfarticles/03/10.pdf>

5. Lisiecki A. Development of laser welding and surface treatment of metals. *Materials*. 2022. Т. 15. № 5. С. 1765. <https://doi.org/10.3390/ma15051765>

6. Liu Y., et al. Mitigation of residual stress and deformation induced by TIG welding in thin-walled pipes through external constraint. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. № 15. С. 4636-4651. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.035>

7. Lobanov L. M., Volkov V. S. Thin-walled welded transformable-volume structures of space purpose. *The Paton Welding Journal*. 2018. № 11-12. С. 41-51. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.04>

8. Lobanov L. M., et al. Functional characteristics improvement of metal transformable-volume structures for space applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2016. № 8. С. 55-62. <https://doi.org/10.5028/jatm.v8i1.529>

9. Lukashenko A. G., Melnichenko T. V., Lukashenko D. A. Laser welding of sheet stainless steel by modulated radiation. *The Paton Welding Journal*. 2012. № 4. С. 15-19.

10. McNair S. A., et al. Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Т. 118. № 3. С. 667-681. DOI 10.1007/s00170-021-07982-8

11. Nagy M., Behúlová M. Design of welding parameters for laser welding of thin-walled stainless steel tubes using numerical simulation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Т. 266. № 1. С. 012013. DOI 10.1088/1757-899X/266/1/012013

REFERENCES:

1. Celen, S., Karadeniz, S., Ozden, H. (2008) 'Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel', *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39(11), pp. 845-850.

2. Huang, X., Zhao, J., Yu, G., Li, R., Ma, B., Wang, C. (2022) 'Analysis of three-roller continuous and synchronous calibration process of straightness and ovality for large thin-walled pipes considering the weld', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(9), pp. 5957-5969. DOI 10.1007/s00170-022-09656-5

3. Khaskin, V. Yu., Korzhyk, V. M., Bernatskii, A. V., Voitenko O. M., Illyashenko Ye. V., Cai D. (2020) 'Features of synergistic effect manifestation in laser-plasma welding of SUS304 steel, using disc laser radiation', *The Paton Welding Journal*, (4), pp. 29-33. DOI 10.37434/tpwj2020.04.04

4. Krivtsun, I. V., Bushma, A. I., Khaskin, V. Yu. (2013) 'Hybrid laser-plasma welding of stainless steels' *The Paton Welding Journal*, (3), pp. 46-50. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2013/pdfarticles/03/10.pdf>

5. Lisiecki, A. (2022) 'Development of laser welding and surface treatment of metals', *Materials*, 15(5), p. 1765. DOI 10.3390/ma15051765

6. Liu, Y., Wang, P., Fang, H., Ma, N. (2021) 'Mitigation of residual stress and deformation induced by TIG welding in thin-walled pipes through external constraint', *Journal of Materials Research and Technology*, 15, pp. 4636-4651. DOI 10.1016/j.jmrt.2021.10.035

7. Lobanov, L. M., Volkov, V. S. (2018) 'Thin-walled welded transformable-volume structures of space purpose', *The Paton Welding Journal*, (11-12), pp. 41-51. DOI 10.15407/tpwj2018.12.04

8. Lobanov, L. M., Volkov, V. S., Yakimkin, A. V., Savitsky, V. V. (2016) 'Functional characteristics improvement of metal transformable-volume structures for space applications', *Journal of Aerospace Technology and Management*, 8, pp. 55-62. DOI 10.5028/jatm.v8i1.529

9. Lukashenko, A. G., Melnichenko, T. V., Lukashenko, D. A. (2012) 'Laser welding of sheet stainless steel by modulated radiation', *The Paton Welding Journal*, (4), pp. 15-19.

10. McNair, S. A., Chaharsooghi, A. S., Carnevale, M., Rhead, A., Onnela, A., Daguin, J., ... Lunt, A. J. (2022) 'Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(3), pp. 667-681. DOI 10.1007/s00170-021-07982-8

11. Nagy, M., Behúlová, M. (2017) 'Design of welding parameters for laser welding of thin-walled stainless steel tubes using numerical simulation', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 266(1), p. 012013. DOI 10.1088/1757-899X/266/1/012013

Стаття надійшла до редакції 10 грудня 2022 року