

Oleksandr V. Siora
Сіора
Олександр
Васильович

УДК 621.791.725

STUDY ON LASER WELDING OF THIN-SHEET T-JOINTS IN DIFFERENT SPATIAL POSITIONS

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ ТАВРОВИХ З'ЄДНАНЬ У РІЗНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОЛОЖЕННЯХ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).03](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).03)



Yurii V. Yurchenko
Юрченко Юрій
Вікторович

Oleksandr V. Siora

Сіора Олександр Васильович, наук. співробітник
siora_ov@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1927-790X

Yurii V. Yurchenko

Юрченко Юрій Вікторович, аспірант
yuriyyurchenko14@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9253-009X

Mykola V. Sokolovskyi

Соколовський Микола Володимирович, PhD,
молодший наук. співр.
m_sokolovskyi@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0003-3243-5060

Taras M. Nabok

Набок Тарас Миколайович, молодший наук. співр.
nabok@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-9582-5763

Artemii V. Bernatskyi

Бернацький Артемій Володимирович,
канд. техн. наук, старш. дослідник
bernatskyi@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-8050-5580



Mykola V. Sokolovskyi
Соколовський
Микола
Володи-
мирович

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

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



Taras M. Nabok
Набок Тарас
Миколайович



Artemii V. Bernatskyi
Бернацький
Артемій
Володимирович

Abstract. T-joints are one of the primary types of structural elements in thin-walled, complex-profile ship structures, providing the necessary stiffness and strength at minimal weight. They are widely used in hull and superstructure components, where uniform stress distribution, fillet formation, and the absence of defects in the weld zone are critical. The aim of this study was to investigate technological schemes for laser welding T-joints made of thin-sheet heat-resistant steel AISI 321 in various spatial positions and to determine the influence of welding parameters on the geometric, structural, and mechanical characteristics of welds. Technological welding schemes in horizontal and vertical spatial positions were studied, performed both in continuous and pulsed laser radiation modes, with variations in power, welding speed, and laser beam defocusing. Visual, radiographic, and metallographic inspections were carried out in accordance with ISO 13919-1:1996 and ISO 17639:2003, while static tensile testing followed ISO 6892-1:2016. The results showed that for the horizontal spatial position, the most promising schemes were those with two passes in pulsed welding mode, ensuring guaranteed fillet formation on both sides of the rib, a uniform transition from flange to rib, and high mechanical properties. Samples welded according to schemes №1 and №2 exhibited strength exceeding that of the base metal; however, additional passes, as in scheme №3, led to a decrease in fracture resistance due to repeated heating and cooling of the weld metal. For the vertical spatial position, it was established that stable weld and fillet formation is achieved over a wider range of

parameters than in the horizontal position. Samples welded according to schemes №4–№7 corresponded to a high-quality level “B,” with the majority of failures occurring in the base metal of the rib, indicating high mechanical performance of the welds. The best results were obtained using schemes with two main passes and an additional “smoothing” pass, providing stable weld geometry and guaranteed fillet formation on both sides. Vertical welding also ensured lower variability in fracture resistance (10–20% higher than average values in the horizontal position) and more stable weld formation. Metallographic studies revealed the formation of an austenitic dendritic structure in the weld zone with a uniform crystal size in the flange–rib transition, while radiographic inspection confirmed the absence of internal defects in high-quality welds. Comparison of the welding schemes demonstrated that the optimal solutions for industrial applications are those that minimize the effect of gravity on joint formation and ensure controlled fillet geometry.

Key words: thin-walled products; stainless steel; laser welding; spatial positions; T-joints, mechanical properties.

Анотація. Таврові з'єднання є одним з основних видів конструктивних елементів у тонкостінних складнопрофільних конструкціях суден, що забезпечують необхідну жорсткість і міцність при мінімальній масі. Вони широко використовуються у корпусних і надбудовних елементах, де важливими є рівномірний розподіл напружень, формування галтелей та відсутність дефектів у зоні зварного з'єднання. Метою даної роботи було дослідження технологічних схем лазерного зварювання таврових зварних з'єднань з тонколистової жароміцної сталі AISI 321 у різних просторових положеннях та визначення впливу параметрів зварювання на геометричні, структурні та механічні характеристики зварних швів. Досліджувалися технологічні схеми зварювання у нижньому та вертикальному просторових положеннях, виконані як у неперервному, так і імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання, з варіюванням потужності, швидкості зварювання та розфокусування лазерного пучка. Візуальний, радіографічний та металографічний контроль здійснювався відповідно до ISO 13919-1:1996 та ISO 17639:2003, а випробування на статичний розтяг – за ISO 6892-1:2016. Результати досліджень показали, що для нижнього просторового положення найбільш перспективними є технологічні схеми із двома проходами та імпульсним режимом зварювання, які забезпечують гарантоване формування галтелей з обох сторін від ребра, рівномірний перехід полиця–ребро та високий рівень механічних властивостей. Зразки, зварені за схемами №1 та №2, показали міцність, що перевищує міцність основного металу, проте додаткові проходи, як у схемі №3, призводили до зниження опору руйнуванню через повторне нагрівання та охолодження металу шва. Для вертикального просторового положення встановлено, що стабільне формування шва та галтелей досягається у більш широкому діапазоні параметрів, ніж у нижньому положенні. Зразки, зварені за технологічними схемами №4–№7, відповідали високому рівню якості «В», при цьому переважна більшість руйнувалася по основному металу ребра, що свідчить про високі механічні характеристики зварних з'єднань. Найкращі показники отримані за схемами із двома основними проходами та додатковим «розгладжуючим» проходом, які забезпечують стабільну геометрію шва та гарантоване формування галтелей з обох сторін. Зварювання у вертикальному положенні забезпечує менший розкид значень опору руйнуванню (на 10–20% вище середніх значень, ніж у нижньому положенні) та більш стабільне формування швів. Металографічні дослідження показали формування аустенітної дендритної структури в зоні шва із рівномірним розміром кристалітів у переході полиця–ребро, а радіографічний контроль засвідчив відсутність внутрішніх дефектів у зварних швах високої якості. Порівняння схем зварювання показало, що оптимальними для промислового застосування є технологічні рішення, що забезпечують мінімальний вплив гравітації на формування з'єднання та контрольовану геометрію галтелей.

Ключові слова: тонкостінні вироби; високолеговані корозійностійкі сталі; лазерне зварювання; просторові положення; таврові з'єднання; механічні властивості.

References

- [1] Ibrahim, R. A. (2016). Overview of structural life assessment and reliability, Part V: Joints and Weldments. *Journal of Ship Production and Design*, 32(01), 1-20. <https://doi.org/10.5957/jspd.2016.32.1.1>
- [2] Kozak J., & Kowalski, J. (2015). Problems of determination of welding angular distortions of T-fillet joints in ship hull structures. *Polish maritime research*, 2(86), 79-85. <http://doi.org/10.1515/pomr-2015-0020>

- [3] Choi, W.-S., Kim, D.-H., Nam, J.-H., Kim, M.-J., & Son, Y.-B. (2021). Estimating production metric for ship assembly based on geometric and production information of ship block model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 39. <https://doi.org/10.3390/jmse9010039>
- [4] Urbański, T. *et al.* (2018) Assessment of technological usefulness of panel production line in shipbuilding process. *Polish Maritime Research*, 25(1), 134–144. <http://doi.org/10.2478/pomr-2018-0034>
- [5] Baek, S.-Y., & Nam, J.-H. (2021). Physical welding factors for reclassified welding positions in shipbuilding assembly process based on muscle activity measured by surface electromyography. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), 1211. <https://doi.org/10.3390/jmse9111211>
- [6] Jiang, X. X., Saffirna, M. S., Rejab, M. R. M., Romli, N. K., & Ma, Q. (2022). Experiment on different T-joint characteristics for laser-welded I-core galvanized steel sandwich plates. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1179–1185. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.036>
- [7] Kumar, N., Mukherjee, M., & Bandyopadhyay, A. (2017). Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam. *Optics & Laser Technology*, 94, 296–309. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.04.008>
- [8] Yurchenko, Y., Siora, O., Sokolovskiy, M., Hryn, A., Frolov, M., & Bernatskyi, A. (2025). Influence of laser welding parameters on the geometry of welded joints of thin-sheet stainless steel AISI 304. *Advances in mechanical engineering and transport*, 2(25), 87–96. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1914>
- [9] Sun, J., Feng, K., Zhang, K., Guo, B., Jiang, E., Nie, P., Huang, J., & Li, Z. (2017). Fiber laser welding of thick Aisi 304 plate in a horizontal (2G) butt joint configuration. *Materials & Design*, 118, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.015>
- [10] Chang, B., Yuan, Z., Cheng, H., Li, H., Du, D., & Shan, J. (2019). A study on the influences of welding position on the Keyhole and molten pool behavior in laser welding of a titanium alloy. *Metals*, 9(10), 1082. <https://doi.org/10.3390/met9101082>
- [11] Liu, W., & Zhang, H. (2025). Numerical Analysis of welding deformation in double T-joints of 304 stainless steel sheet. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 147(4). <https://doi.org/10.1115/1.4068496>
- [12] Chen, Q., Fei, F., Yu, S., Liu, C., Tang, J., & Yang, X. (2020). Numerical simulation of temperature field and residual stresses in stainless steel T-joint. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(3), 751–761. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01890-3>
- [13] Guerra, M., Pereira, D., Neto, J. B., Nunes, G., Sarmanho, A., & Lima, L. (2021). Structural behaviour of thin-walled CHS-RHS T-joints: Experimental and numerical assessment. *Structures*, 32, 548–561. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.008>
- [14] Pereira, D. J., Sarmanho, A. M., Nunes, G. V., Guerra, M. J., & Alves, V. N. (2019). Effect of fillet welds on t-joints with thin-walled chords. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 172(4), 301–312. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00043>
- [15] Pickarska, W., Saternus, Z., Sapieta, M., & Kopas, P. (2019). The influence of joining technique on the deformation of laser welded T-joints. *MATEC Web of Conferences*, 254, 02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925402011>
- [16] Wojsyk, K., & Nawrocki, J. (2020). Study on the impact of lack of fusion in the fillet weld on its fatigue strength under various load combinations. *Welding Technology Review*, 92(1), 17–24. <https://doi.org/10.26628/wtr.v92i1.1086>
- [17] Chen, Z., Yu, B., Wang, P., & Qian, H. (2023). Fatigue properties evaluation of fillet weld joints in full-scale steel marine structures. *Ocean Engineering*, 270, 113651. <https://doi.org/10.1016/j.ocean-eng.2023.113651>
- [18] Gu, Z., Zhu, X., Ding, Q., Duan, S., Wang, P., & Lu, X. (2023). Tensile failure analysis of laser stake-welded T-joints: X-ray tomography based conformal finite element and fractal theoretical approaches. *Engineering Failure Analysis*, 150, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107299>

Постановка задачі. Виготовлення корпусних і надбудовних конструкцій суден пов'язане з широким використанням тонколистових елементів зі сталей і сплавів, що з'єднуються між собою у вигляді стикових, кутових та, насамперед, таврових з'єднань [1, 2]. Такі з'єднання формують силовий набір корпусу, переборки, палубні елементи та внутрішні конструктивні вузли, до яких висувуються підвищені вимоги щодо міцності, герметичності та корозійної стійкості. Характерною особливістю суднобудівного виробництва є великі габаритні розміри зварюваних секцій, що істотно обмежує можливість їхнього повороту або встановлення у нижнє просторове положення [3, 4]. У результаті значна частина зварних швів виконується у вертикальних, похилих або комбінованих просторових положеннях. Для тонколистових таврових з'єднань це призводить до ускладнення формування зварювальної ванни, підвищеної ймовірності дефектів та зростання ролі людського фактору при застосуванні традиційних дугових способів зварювання [5].

Лазерне зварювання розглядається як перспективна технологія для таких умов завдяки високій концентрації енергії, малому тепловкладенню та можливості точного керування параметрами процесу [6]. Разом із тим, при зварюванні у просторових положеннях, відмінних від нижнього, процес лазерного зварювання зазнає впливу сил гравітації, що змінюють умови утримання рідкого металу у зварювальній ванні та стабільність каналу проплавлення [7]. Це особливо критично для таврових з'єднань, де асиметрія тепловідводу та геометрії стику ускладнює забезпечення рівномірного проплавлення обох елементів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз сучасних досліджень у галузі лазерного зварювання показує, що більшість експериментальних і теоретичних робіт виконуються для умов нижнього просторового положення зварювання [8–10]. Це пояснюється як спрощеними умовами формування зварювальної ванни, так і можливістю використання стандартного технологічного устаткування без необхідності його просто-

рової адаптації. Разом із тим, для галузей із великогабаритними конструкціями, зокрема суднобудування, такі умови є скоріше винятком, ніж правилом.

Найбільш гостро проблема зниження рівня залишкових напружень та величини деформацій постає при виготовленні тонкостінних складнопрофільних конструкцій, наприклад, панелей чи деталей замкнутого профілю різної конфігурації [11, 12]. Зниження маси таких конструкцій досягається за рахунок зменшення товщини матеріалів, що найчастіше з'єднуються між собою за допомогою використання різних способів зварювання. А забезпечення заданих характеристик міцності конструкцій, досягається за рахунок використання як нових матеріалів з підвищеним рівнем необхідних характеристик, так й певних конструктивних елементів.

Таврові з'єднання є одним з найпоширеніших видів конструктивних елементів, які використовуються у тонкостінних складнопрофільних конструкціях для надання їм необхідних характеристик жорсткості та міцності при їх невеликій масі [13, 14]. При виготовленні таврових з'єднань за допомогою різних способів зварювання плавленням, найбільш поширеною є технологічна схема, що показана на Рис. 1.а, коли зварювання виконують зі сторони ребра під певним кутом. До переваг такої технологічної схеми зварювання таврових з'єднань слід віднести: відносну простоту технологічного оснащення; можливість виконання зварювання за один чи за два проходи при односторонньому зварюванні; при виконанні зварювання за один прохід при двосторонньому зварюванні, яке показано на Рис. 1.б (при одночасному застосуванні двох джерел нагрівання), забезпечується гарантоване формування галтелей у зоні з'єднання полиці з ребром та симетричний розподіл теплових полів та напружень; можливість рознесення у часі та просторі джерел нагріву при виконанні двостороннього зварювання; тощо.

Однак існує багато конструкцій, у яких доступ зі сторони ребра таврового зварного з'єднання обмежений або неможливий, що не дозволяє застосувати технологічну схему

зварювання, що наведена на Рис. 1.а. У такому випадку використовують технологічну схему зварювання, наведену на Рис. 1.в. Згідно такої технологічної схеми, зварювання виконують зі сторони полиці таврового з'єднання, шляхом її наскрізного проплавлення та розплавлення певної ділянки ребра. Але в цьому випадку відсутня можливість візуального контролю положення місця кромок зварного з'єднання при підготовці до зварювання. Це значно ускладнює та здорожує етап підготовки таврових зварних з'єднань, оскільки потребує використання додаткових технологічних та організаційних заходів, які полягають у застосуванні більш точного та відповідно більш дорожчого технологічного оснащення для збирання зварних з'єднань.

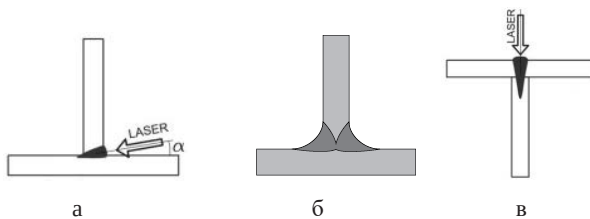


Рис. 1. Схеми лазерного зварювання таврових з'єднань: а) одностороннє зварювання, б) формування галтелей при двосторонньому зварюванні, в) зварювання прорізним швом [15]

Окрім того, постає проблема забезпечення необхідних значень характеристик міцності таврових зварних з'єднань, які одержанні за технологічною схемою зварювання, що наведена на Рис. 1.в. Для таврових зварних з'єднань, що працюють в різних умовах навантаження на полицю зварного з'єднання зі сторони ребра, необхідною умовою якості та досягнення заданих характеристик довготривалої міцності, також є формування галтелей з кожної сторін від ребра [16]. Галтелі повинні мати певний радіус переходу від металу ребра до металу полиці, як показано на Рис. 1.б. За відсутності галтелей з обох сторін ребра, або при наявності непроварених ділянок у зоні з'єднання ребра з полицею, можливе утворення дефектів у вигляді підрізів [17]. Це може призвести до значного зростання рівня напружень у даній ділянці зварного з'єднання, а згодом, при довготривалій експлуатації зварного з'єднання та при перевищенні рівня напружень певних значень, до його руйнування.

плуатації зварного з'єднання та при перевищенні рівня напружень певних значень, до його руйнування.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз літературних джерел свідчить, що переважна більшість досліджень лазерного зварювання орієнтована на нижнє просторове положення та технологічні схеми з вільним доступом до зони зварювання. Водночас недостатньо вивченими залишаються процеси формування зварного шва і галтелей у таврових з'єднаннях тонкостінних конструкцій за умов обмеженого або відсутнього доступу зі сторони ребра, коли зварювання здійснюється зі сторони полиці шляхом наскрізного проплавлення. Зокрема, не повною мірою досліджено вплив такої технологічної схеми на стабільність формування зони з'єднання, забезпечення симетричних галтелей, рівень залишкових напружень і довготривалу міцність таврових зварних з'єднань. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на обґрунтування технологічних параметрів лазерного зварювання та вимог до підготовки і збирання таких з'єднань.

У зв'язку з цим набуває актуальності задача одержання таврових зварних з'єднань з гарантованим формуванням галтелей заданого радіусу, при зварюванні за технологічною схемою, що наведена на рис. 1.в. Ця задача більш ускладнюється при товщині елементів зварних з'єднань (ребра та полиці) близьких до одного міліметра. Дана задача може бути вирішена шляхом удосконалення технологічної схеми зварювання таврових з'єднань, що наведена на рис. 1.в, за рахунок застосування різних технологічних прийомів, а саме:

- режиму генерації лазерного випромінювання;
- змінення кількості проходів;
- просторового положення;
- положення фокусної площини, відносно поверхні полиці.

Мета дослідження. Метою даної роботи є дослідження технологічних схем лазерного зварювання таврових зварних з'єднань з тонколистової жароміцної сталі AISI 321 і вибір найбільш перспективних рішень для

промислового використання. Це буде ґрунтуватися на встановленні впливу технологічних параметрів на якість формування, рівень механічних властивостей та структурні особливості тонкостінних таврових зварних з'єднань, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. У якості матеріалу дослідження використовували сталь AISI 321. Сталь AISI 321 – корозійностійка високолегована жароміцна аустенітна сталь, яка набула найбільшого поширення в промисловості через можливість успішного використання її в різноманітних експлуатаційних умовах. Вона має високу корозійну стійкість у низці рідких середовищ, стійка проти міжкристалітної корозії після зварювального нагріву, порівняно мало окрихчується в результаті тривалого впливу високих температур і може бути застосована як жароміцний матеріал за температур $\sim 600^\circ \text{C}$. Хімічний склад сталі AISI 321 наведений у Таблиці 1.

Таврові з'єднання одержували за допомогою лазерного зварювання зі зразків виготовлених з листової корозійностійкої жароміцної сталі AISI 321. Для виготовлення ребер таврових зварних з'єднань застосовували листи зі сталі AISI 321 товщиною 1,2 мм, а для виготовлення полиці таврових зварних з'єднань – товщиною 0,8 мм.

Для експериментів використовували Nd:YAG-лазер «DY044» виробництва фірми «ROFIN-SINAR» (Німеччина) з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$.

Заготовки зразків закріплювалися у струбцині і зварювалися в нижньому просторовому положенні і вертикальному просторовому положенні. Зварний шов розташовувався уздовж ліній прокату у сталі AISI 321, яку використовували як полицю таврового зварного з'єднання. Досліджувалися режими зварювання як «на підйом» (з переміщенням лазерної головки знизу вгору, відносно нерухомої струбцини із закріпленим зразком), так і «на спуск» (з переміщенням лазерної голо-

вки зверху вниз, відносно нерухомої струбцини із закріпленим зразком).

Якись одержаних таврових зварних з'єднань оцінювали на відповідність вимогам стандарту ISO 13919-1:1996 та гарантованого одержання галтелей радіусом 2...10 мм з обох сторін від ребра у зварному з'єднанні. З метою отримання швів високого В або середнього С рівнів якості виконання (згідно ISO 13919-1:1996), кромки ребра механічно обробляли (фрезерування чистове). Безпосередньо перед зварюванням (перед закріпленням в зварювальну струбцину) заготовки зразків знежирювали бензином з подальшим очищенням ацетоном. Попередня термічна обробка заготовок перед проведенням операції зварювання не проводилася.

Деталі таврового з'єднання збиралися у зварювальних струбцинах із зусиллям притиску кромки 2...5 МПа. Зазор між ребром і полицею не перевищував 0,1 мм (перевірка здійснювалася за допомогою інструментального щупа). При складанні таврових з'єднань для лазерного зварювання прихвatchні шви не застосовувалися.

Візуальний контроль одержаних зварних з'єднань здійснювався на попередньо механічно очищених від забруднень зразках. Під час проведення візуального контролю використовувалося комбіноване освітлення (денне та місцеве, за допомогою лампи розжарювання) – близько 1000 лк. Були використані вимірювальні прилади і інструменти: лупи переглядові $4\times$ і $10\times$ крат, лупа вимірювальна $10\times$ крат з точністю 0,1 мм, штангенциркуль ШЦ140 (клас 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 та геометричні розміри галтелей; наявність кратерів (усадовчих раковин у кратері) та інші параметри, що передбачені стандартом ISO 13919-1:1996.

Радіографічний контроль здійснювали на попередньо механічно очищених від забруднень зразках. Були використані: рентгенів-

Таблиця 1. Хімічний склад сталі AISI 321, згідно ASTM A480/A480M-22a

Масова частка елементів (максимальна), %									
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
0,12	0,8	2	9-11	0,02	0,035	17 – 19	0,3	0,015	Осн.

ський апарат – РАП 150/300; еталон чутливості – канавковий №1 ГОСТ 7512-82; плівка радіографічна – KODAK – AA400, розмір 240×100 мм; підсилюючі екрани – металеві – Рb-0.027. Режим просвічування: $U = 80$ кВ, $I = 10$ мА, $t = 120$ с, фокусна відстань 1000 мм. Кількість експозицій – 2 (по одній з кожного боку, зі сторони ребра таврового з'єднання). Довжина контрольованої ділянки зварного з'єднання при радіографічному контролі складала 220 мм. За результатами радіографічного контролю оцінювалася наявність внутрішніх дефектів у вигляді тріщин, пор, включень і непроварів.

Металографічні дослідження зварних зразків виконувалися відповідно до стандарту ISO 17639:2003 за допомогою методу світлової мікроскопії (microscopes Versamet-2, Neophot-32). Дослідження проведені на кожній ділянці (шов – зона термічного впливу (ЗТВ) – основний метал) кожного зразка.

Випробування на статичний розтяг зразків таврових зварних з'єднань проводили на сервогидравлічній машині MTS318.25, відповідно до ISO 6892-1:2016 на п'яти зразках, вирізаних з кожного зварного з'єднання. Метою випробування було визначення навантаження, необхідного для руйнування зразка таврового з'єднання при статичному розтягуванні, а також виявлення локалізації місця розриву в тавровому зварному з'єднанні.

Основний матеріал. Проводили зварювання зразків таврових з'єднань зі сталі AISI 321 в різних просторових положеннях використовуючи різні схеми зварювання:

1.1 Лазерне зварювання у нижньому просторовому положенні. Спочатку був розглянутий варіант однопровідного зварювання таврового з'єднання у нижньому просторовому положенні у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання. Він найбільш легкий з точки зору реалізації. Однак досягнути стабільного формування галтелей заданого радіуса з обох сторін зварного з'єднання при згаданих умовах експерименту не вдалося. За рахунок варіювання значеннями параметрів технологічних режимів (потужності лазерного випромінювання; швидкості зварювання; положення фокусної площини, відносно положення поверхні полиці таврового з'єднання, тощо) було випробувано ряд технологічних варіантів реалізації процесу. Однак будь-які незначні

відхилення (менше 5%) від вищезгаданих технологічних параметрів процесу, або відхилення лазерної головки під час зварювання від площини симетрії ребра таврового зварного з'єднання призводили до нерівномірного формування галтелей з обох сторін від ребра зварного з'єднання, або навіть до формування лише однієї галтелі з однієї сторони ребра зварного з'єднання.

Тому для лазерного зварювання в нижньому просторовому положенні було розглянуто більше десяти удосконалених технологічних схем зварювання, з яких визначені три найбільш перспективні, що відрізняються параметрами технологічних режимів, та промислове застосування кожної з яких дозволяє отримати контрольне таврове зварне з'єднання, яке задовольняє вимогам отримання швів заданих геометричних розмірів (з гарантованим формуванням галтелей) та високого В або середнього С рівнів якості виконання (згідно ISO 13919-1:1996).

У всіх випадках зварювання в нижньому просторовому положенні виконували з подачею аргону в якості захисного газу з різними витратами у певних областях: в область зварювальної ванни 25 л/хв; знизу полиці – 5 л/хв (сумарно по обидва боки ребра); в «хвіст» зварювальної ванни – 20 л/хв.

За результатами візуального та радіографічного контролю, серед зразків зварених в нижньому просторовому положенні дефектів не виявлено, однак спостерігається недостатнє підсилення верхнього валика шва. Незважаючи на виявлений недолік, всі зразки, зварені в нижньому просторовому положенні, відповідають рівню якості «високий В» згідно ISO 13919-1:1996.

1.1.1. Технологічна схема зварювання

№1. З метою гарантованого формування галтелей заданої геометричних розмірів з кожної зі сторін від ребра таврового зварного з'єднання, було розглянуто варіант технологічної схеми №1, згідно з яким лазерне зварювання виконували за два проходи, виконанні один за одним, з відступом на задану відстань $D = 0.2 \dots 0.5$ мм. Зварювання виконували у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання потужністю P від 3,0 до 4,4 кВт з величиною розфокусування $D = -4 \dots +4$ мм, на швидкості зварювання $V = 50 \dots 300$ мм/с.

Результати, кращі з точки зору формування зварного з'єднання, особливо стабільності формування галтелей уздовж шва, були одержані при зварюванні у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання потужністю 4,4 кВт без розфокусування ($D = 0$ мм), на швидкості 100 мм/с з відступом від площини симетрії ребра на величину 0,3 мм для кожного з проходів.

На Рис. 2 а,б показане зварне з'єднання, що виконано за технологічною схемою №1. Результати металографічних досліджень параметрів структурних особливостей зварного з'єднання одержаного за технологічною схемою №1 наведено у Таблицях 2 та 3.

Варто відзначити, що за результатами механічних випробувань на статичний розтяг, наведених у Таблиці 4, встановлено, що одержані за технологічною схемою №1 зварні з'єднання, забезпечують достатньо

високий опір зусиллю руйнування (середнє значення розраховувалося за результатами випробувань 5 пластин, вирізаних з одного зразка, без урахування максимального і мінімального значення). Руйнування усіх зразків відбувалося по основному металу ребра таврового зварного з'єднання №1 для усіх проведених експериментів. Це також свідчить про досягнення високих показників міцності одержаних зварних з'єднань.

Виконання зварювання у два проходи зі зміщенням від середини ребра на 0,3 мм дозволило забезпечити задану конфігурацію таврових зварних з'єднань та одержати відносно високі показники міцності. Зварні з'єднання одержані за технологічною схемою №1, відповідають вимогам отримання швів середнього С рівня якості виконання, згідно ISO 13919-1:1996. До основних недоліків даної технологічної схеми зварювання

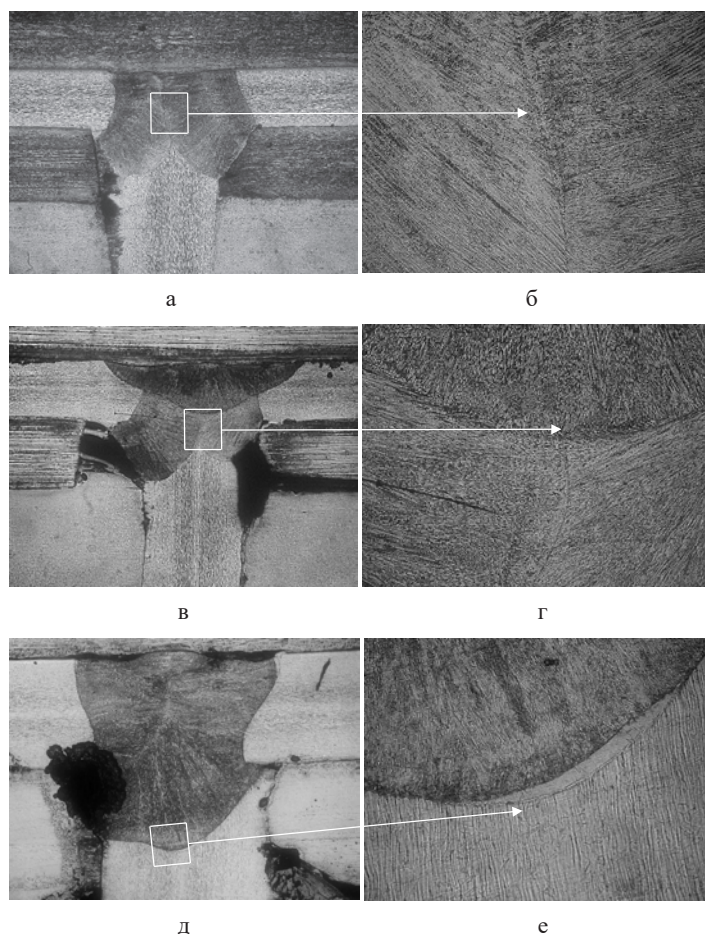


Рис. 2. Таврові зварні з'єднання, одержані у нижньому просторовому положенні: загальний вигляд, $\times 25$: а – схема №1, в – схема №2, д – схема №3; мікроструктура металу: б – зона перекриття швів двох проходів №1, $\times 320$; г – зона перекриття швів трьох проходів №2, $\times 156$; е – перехідна зона між швом та ребром №3, $\times 320$

таврових з'єднань з тонколистової аустенітної сталі AISI 321, слід віднести наступні:

1. технологічну складність виконання умови відступу на задану відстань від площини симетрії ребра;

2. наявність ослабленої зони у зварному з'єднанні з двічі переплавленим металом шва та додаткової ЗТВ у вказаній області (див. Рис. 2.а);

3. удвічі меншу продуктивність процесу зварювання, порівняно зі зварюванням за схемою з одним проходом;

4. відсутність підсилення верхнього валика.

1.1.2. Технологічна схема зварювання

№2. На відміну від технологічної схеми №1, лазерне зварювання за технологічною схемою №2 включало третій прохід, окрім двох

Таблиця 2. Параметри структури та механічні властивості таврових зварних з'єднань

ТСЗ ^а	Розмір структурних складових (мкм)			
	$h_1 r \times L_1^b$	$h_2 \times L_2^c$	D ^г	δ^d
1	4...10r	3...830...50	10...20	40...50
2	2...8r	2...5r	8...20	40...50
3	5...12r	4...6r	10...20	25...35
4	10...15r	5...10r	10...20	40...60
5	8...12×20...100	3...8r	10...20	40...50
6	15...25×20...100	3...8r	10...20	30...45
7	10...20r	3...10r	10...20	40...60

^а ТСЗ – Технологічна схема зварювання.

^б $h_1 r \times L_1$ – Розміри кристалітів у шві.

^в $h_2 \times L_2$ – Розміри кристалітів у перехідній зоні.

^г D – Розмір аустенітного зерна з боку основного металу ребра у лінії сплавлення.

^д δ – Ширина перехідної зони.

Таблиця 3. Механічні властивості таврових зварних з'єднань

ТСЗ ^а	Мікротвердість (МПа)		
	HV _ш ^б	HV _{пз} ^в	HV _{лс} ^г
1	2510...2740	2280...2380	2340...2380
2	2240...2470	2280...2320	2260...2300
3	2510...2540	2610...2670	2410...2450
4	2360...2680	2280...2450	2300...2540
5	2360...2490	2450...2700	2480...2540
6	2450...2670	2480...2660	2450...2640
7	2540...2740	2560...2740	2360...2660

^а ТСЗ – Технологічна схема зварювання.

^б HV_ш – Мікротвердість кристалітів у шві.

^в HV_{пз} – Мікротвердість кристалітів у перехідній зоні.

^г HV_{лс} – Мікротвердість аустенітного зерна з боку основного металу ребра у лінії сплавлення.

Таблиця 4. Результати механічних випробувань таврових зварних з'єднань

ТСЗ ^а	Q ^б (Н)		N ^в (%)	
	Діапазон значень	Середнє значення	По металу шва	По основному металу ребра
1	20289...21240	20951	0	100
2	19590...21830	20460	60	40
3	18044...19504	18714	100	0
4	20944...21829	21566	40	60
5	18500...21882	20883	40	60
6	15234...18763	17587	100	0
7	21394...23232	21887	0	100

^а ТСЗ – Технологічна схема зварювання.

^б Q – Значення опору зварного з'єднання зусиллю розриву.

^в N – Кількість зразків, що зруйнувалися у відповідній області таврового зварного з'єднання.

основних проходів в відступом від середини ребра на 0,3 мм (на режимах, тотожних з режимами за схемою №1), які виконувались для належного формування галтелей з обох сторін таврового зварного з'єднання. Третій прохід виконувався для оплавлення поверхні для забезпечення належного формування верхнього валика полиці зварного з'єднання. Третій «розгладжуючий» прохід виконували у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при варіюванні параметрів технологічних режимів у наступних діапазонах: $P=1,0\ldots3,0$ кВт; $\Delta F=+10\ldots+30$ мм; $V=1\ldots50$ мм/с.

На Рис. 2.в,г показане зварне з'єднання, що виконано за технологічною схемою №2, згідно якої третій прохід виконували у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при потужності $P=1,5$ кВт, з величиною розфокусуванням $D F=+20$ мм, та швидкості обробки 25 мм/с. Положення фокусу лазерного випромінювання було заглиблено відносно поверхні зразка на 4 мм. Зварювання виконували на швидкості 75 мм/с. Як свідчать дані металографічних досліджень, металу в зоні оплавлення після зварювання, характерно формування аустенітної дендритної структури з підвищеним розміром кристалітів (Рис. 2.в,г та Таблиця 2). Дослідженнями структури так само показано, що за глибиною переходу з оплавленого металу в шов (при переході полиця-ребро) за розмірами структурних складових дендритна структура має рівномірний характер.

Додатковий прохід дозволяє одержати зразки з геометричними розмірами, які відповідають вимогам високого В рівня якості (згідно ISO 13919-1:1996). Однак за результатами механічних випробувань на статичний розтяг встановлено, що зразки зварені за технологічною схемою №2, показують велику розкид значень опору зусиллю руйнування. Це може бути викликано відсутністю стабільності при формуванні зварних з'єднань. Такі висновки підтверджуються тим, що руйнування 60% зразків в результаті механічних випробувань відбувалося по металу шва, й лише 40% зразків зруйнувалися по основному металу ребра таврового зварного з'єднання.

1.1.3. Технологічна схема зварювання №3. З метою усунення негативного впливу на структуру та механічні властивості зварних з'єднань, в результаті повторного нагрівання та охолодження при виконанні додаткових проходів при формуванні таврових зварних з'єднань відповідно до технологічних схем №1 та №2, лазерне зварювання зразків за технологічною схемою №3 виконували за один прохід у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання. Це дозволило гарантовано одержати рівномірне формування галтелей з обох сторін від ребра таврового зварного з'єднання при використанні більш ніж у 2 рази розширеного діапазону параметрів технологічних режимів, порівняно зі зварюванням у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання. Параметри були наступними: потужність у імпульсі $P_{\text{макс}}=3,0\ldots4,4$ кВт, частота імпульсів 100...250 Гц, та коефіцієнті заповнення $\xi=50\ldots75\%$. Фокус лазерного пучка був заглиблений на 2,0...4,0 мм відносно поверхні зразка. Зварювання виконували на швидкостях 50...100 мм/с.

На Рис. 2. д,е наведено зварне з'єднання, одержане за технологічною схемою №3 на режимах, максимально наближених до оптимальних, за критеріями забезпечення двостороннього формування галтелей, заданих розмірів та максимального рівня механічних характеристик таврового зварного з'єднання: при значенні максимуму потужності у імпульсі $P_{\text{макс}}=4,4$ кВт, частоті імпульсів 250 Гц, та коефіцієнті заповнення $\xi=75\%$. Положення фокусу лазерного пучка було нижче поверхні зразка на 4 мм. Зварювання виконували на швидкості 75 мм/с.

Підсумовуючи розгляд технологічних схем, що базуються на лазерному зварюванні у нижньому просторовому положенні, зазначимо наступне. За результатами механічних випробувань на статичний розтяг (Таблиця 4) встановлено, що зразки, зварені за технологічною схемою №3, забезпечують порівняно невисоке значення опору зварного з'єднання зусиллю розриву. Підкреслимо, що руйнування усіх зразків відбувалося по металу шва таврового зварного з'єднання №3 для усіх проведених експериментів. Та-

ким чином, до особливостей з'єднань, одержаних за технологічною схемою №3 треба віднести нерівномірність у формуванні галтелей з обох сторін зварного з'єднання та низький рівень характеристик міцності, що не дає нам приводу рекомендувати її до використання у промисловості.

1.2. Лазерне зварювання у вертикальному просторовому положенні. При лазерному зварюванні у вертикальному просторовому положенні, розглядалися режими зварювання і досліджувалися варіанти зварювання як «на підйом» (з переміщенням лазерної головки уздовж вертикалі знизу вгору, відносно нерухомої струбцини із закріпленням зразком), так і «на спуск» (з переміщенням лазерної головки зверху вниз, відносно нерухомої струбцини із закріпленням зразком).

Слід відзначити загальну позитивну тенденцію розширення (майже у 2 рази) діапазону технологічних параметрів режимів, при яких досягається стабільне одержання заданої форми і геометричних розмірів шва зварного з'єднання з гарантованим формуванням галтелей з обох сторін від ребра. Це відрізняє зварювання у вертикальному просторовому положенні від зварювання у нижньому просторовому положенні.

Для лазерного зварювання в вертикальному просторовому положенні були визначені чотири технологічні схеми зварювання, застосування кожної з яких дозволяє отримати контрольне таврове зварне з'єднання яке задовольняє вимогам отримання швів високого В або середнього С рівнів якості виконання (згідно ISO 13919-1:1996). Використовували те ж саме оснащення для захисту металу зварного з'єднання аргонном від впливу оточуючого середовища, що й для зварювання у нижньому просторовому положенні.

За результатами проведення візуального контролю встановлено, що всі зразки, зварені в вертикальному просторовому положенні, відповідають рівню якості «високий В», згідно з ISO 13919-1:1996.

У всіх зразках, зварених в вертикальному просторовому положенні виявлені поодинокі пори розміром не більше 0,5 мм. За

результатами проведення радіографічного контролю встановлено, що всі зразки, зварені в вертикальному просторовому положенні, відповідають рівню якості «С помірний» згідно ISO 13919-1:1996.

1.2.1. Технологічна схема зварювання №4. Технологічна схема №4 відрізнялась від технологічної схеми №1 лише зміною просторового положення з нижнього на вертикальне. Зварювання виконували у напрямку згори вниз. Інші параметри технологічних режимів залишились без змін, аналогічно технологічній схемі №1.

Кращі результати, з точки зору одержання геометричних розмірів зварного з'єднання та стабільності формування галтелей, були одержані при зварюванні у неперервному режимі гену $\Delta F=0$ мм, на швидкості 100 мм/с з відступом від середини ребра на величину 0,3 мм для кожного з проходів.

Незважаючи на порівняно високі показники міцності (див. Таблицю 4), зразки одержані за технологічною схемою №4 руйнувалися як по основному металу ребра (60% зразків) так й по металу шва (40%).

Порівняння зразків одержаних за схемами №1 (Рис. 2.а,б) та №4 (Рис. 3.а,б), показує незначне зростання показників міцності та мікротвердості при зміні положення зварювання з нижнього на вертикальне. У той же час треба відзначити підвищення нестабільності у формуванні шва, а також багатоваріантність положення місця руйнування зварних з'єднань.

1.2.2. Технологічна схема зварювання №5. Технологічна схема №5 відрізнялась від схем №1 та №4 значеннями параметрів режимів найкращих, з точки зору формування зварного з'єднання та стабільності формування галтелей, а саме збільшенням величини розфокусування до D рації лазерного випромінювання потужністю 4,4 кВт без розфокусування $\Delta F=+4$ мм, збільшеною з 100 мм/с до 113 мм/с швидкістю зварювання, а також зміною просторового положення з нижнього на вертикальне. Зварювання за технологічною схемою №5 виконували у напрямку знизу вгору. Інші параметри технологічного режиму залишились без змін, аналогічно схемі №1.

Як видно з фотографій, наведених на Рис. 3.в,г та з Таблиці 2, зміна положення фокусу, відносно поверхні зразка, призвела до значних змін у геометричних розмірах зварних з'єднань, у порівнянні зі зразками, одержаними за технологічною схемою №1.

На відміну від зразків, одержаних за технологічною схемою №2, таврові зварні з'єднання одержані при виконанні зварювання за технологічною схемою №7, демонструють не тільки високий рівень механічних характеристики,

а й високу стабільність у формуванні зварних з'єднань. Це підтверджується тим, що всі зварні з'єднання одержані за технологічною схемою №7 зруйнувалися по основному металу ребра, на відміну від зразків, одержаних у нижньому просторовому положенні за технологічною схемою №2.

За результатами механічних випробувань на статичний розтяг встановлено, що зразки зварені за технологічною схемою №5, показують великий розкид у значеннях опору

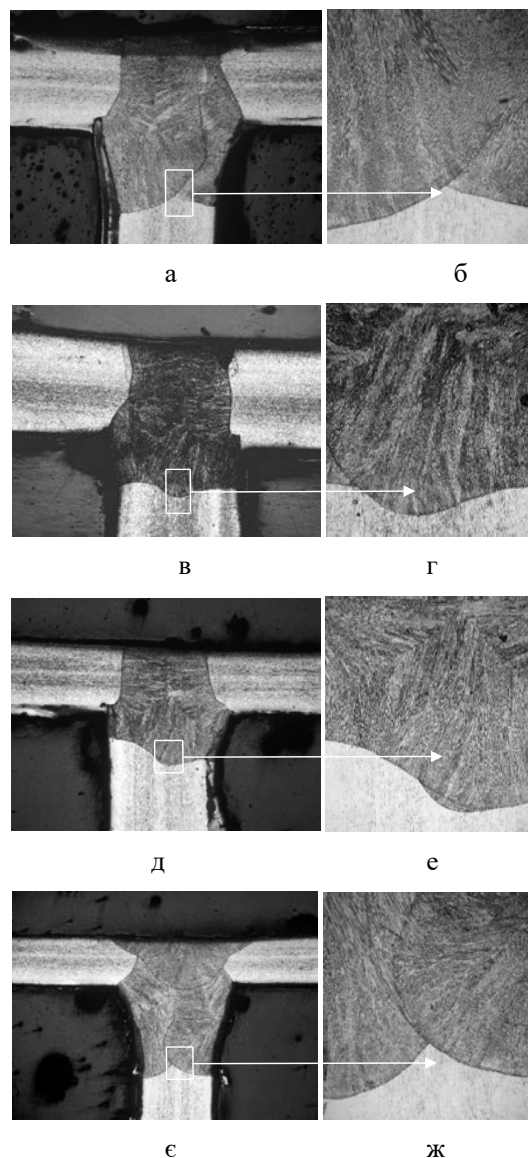


Рис. 3: Таврові зварні з'єднання, одержані у вертикальному просторовому положенні: загальний вигляд, $\times 30$: а – схема №4, в – схема №5, д – схема №6, е – схема №7; мікроструктура металу: б – перехідна зона між швом та ребром №4, $\times 100$; г – перехідна зона між швом та ребром №5, $\times 100$; е – центральна зона шва №6, $\times 100$; ж – центральна зона шва №7, $\times 100$

зусиллю руйнування. Це може свідчити про відсутність стабільності при формуванні зварних з'єднань. Такі висновки підтверджуються тим, що руйнування більшості зразків відбувалося по основному металу ребра таврового зварного з'єднання.

1.2.3. Технологічна схема зварювання №6. Лазерне зварювання таврових зварних з'єднань за технологічною схемою №6 виконували в імпульсному режимі, який за своїми параметрами був ідентичним з режимами технологічної схеми №3, окрім величини розфокусування. Для схеми №6 оптимальне значення положення фокусу складало $\Delta F=0$ мм. Окрім того, на відміну від схеми №3, зразки за схемою №6 зварювали у вертикальному положенні згори вниз.

Такі зміни у режимах призвели до значних змін формування зварних з'єднань (Рис. 3.д,е), однак слабо позначився на змінах структури (Таблиця 2). У той же час, відсутність стабільності при формуванні верхнього валика зварного з'єднання за технологічною схемою №6 вплинула на показники міцності (Таблиця 4). За результатами механічних випробувань на статичний розтяг встановлено, що всі зразки, зварені за технологічною схемою №6, руйнувалися по металу шва зварного з'єднання та забезпечували найнижчу міцність з усіх технологічних схем.

1.2.4. Технологічна схема зварювання №7. За аналогією з технологічною схемою №2, лазерне зварювання за технологічною схемою №7 виконували за два проходи у неперервному режимі «на спуск» з відступом від осі ребра на величину 0,3 мм з різною величиною розфокусування (встановлене найкраще значення $\Delta F=0$ мм) і подальшим третім проходом для оплавлення зони зварювання на швидкості 25 мм/с і потужності 1,5 кВт з розфокусуванням 20 мм.

За результатами механічних випробувань зварних з'єднань, одержаних за схемою №7 (Рис. 3.є,ж), встановлено, що всі зразки були зруйновані по основному металу ребра. Значення опору зусиллю руйнування досить високе.

Як видно, з вищенаведених даних, в окремих випадках для зразків, зварених за технологічними схемами (№2, №4, №5), має

місце руйнування як по основному металу, так і по металу шва. Це, може бути пов'язано з відсутністю стабільності при формуванні зварних з'єднань, і особливо таких конструктивних елементів, як галтелі. У той же час, для зразків зварених у вертикальному положенні більш характерним є руйнування зразка по ребру, у той час, як для зразків зварених у нижньому положенні такого не спостерігається. Результати механічних випробувань показують, що в порівнянні із зразками звареними в нижньому просторовому положенні, для зразків зварених у вертикальному просторовому положенні характерні показники з меншим розкидом. Це може бути пов'язано з більш стабільним формуванням зварних з'єднань, а також більш високими середніми значеннями опору зусиллю руйнування, що вище приблизно на 10...20% ніж для зварних з'єднань одержаних у нижньому положенні за подібними технологічними схемами.

Обговорення отриманих результатів. Порівняння результатів проведених досліджень лазерного зварювання таврових з'єднань зі сталі AISI 321 з результатами статті [18] показує спільні закономірності щодо впливу параметрів процесу на форму зварного з'єднання та механічні властивості. Виявлено, що оптимальні параметри потужності, швидкості зварювання та положення фокусу лазерного променя значно впливають на стабільність формування шва та профіль галтелей. Дефекти, порожнини та геометричні відхилення у таврових з'єднаннях значно впливають на механічну міцність, особливо поблизу кореня шва. Аналогічно, у проведених експериментах виявлено, що однопрохідні схеми зварювання в нижньому положенні призводили до нестабільного формування галтелей, в той час як багатопрохідні та оптимізовані технологічні схеми забезпечували сталу геометрію шва та високу міцність, з руйнуванням зразків по основному металу.

Висновки. Досліджено технологічні схеми лазерного зварювання таврових з'єднань із тонколистової жароміцної сталі AISI 321 та визначено перспективні рішення для промислового впровадження.

Встановлено розширення майже у 2 рази діапазону технологічних параметрів, за яких забезпечується стабільне формування шва із гарантованим утворенням галтелей з обох боків ребра при зварюванні у вертикальному просторовому положенні порівняно з нижнім.

Найбільш перспективними визначено технологічні схеми №1 (для нижнього по-

ложення) та №7 (для вертикального положення), що забезпечують стабільне формування галтелей, необхідні геометричні параметри шва та високі механічні властивості.

За сукупністю показників доцільно надавати перевагу схемі №7, яка забезпечує вищий рівень механічних характеристик.

Список літератури

- [1] Ibrahim, R. A. (2016). Overview of structural life assessment and reliability, Part V: Joints and Weldments. *Journal of Ship Production and Design*, 32(01), 1-20. <https://doi.org/10.5957/jspd.2016.32.1.1>
- [2] Kozak J., & Kowalski, J. (2015). Problems of determination of welding angular distortions of T-fillet joints in ship hull structures. *Polish maritime research*, 2(86), 79-85. <http://doi.org/10.1515/pomr-2015-0020>
- [3] Choi, W.-S., Kim, D.-H., Nam, J.-H., Kim, M.-J., & Son, Y.-B. (2021). Estimating production metric for ship assembly based on geometric and production information of ship block model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 39. <https://doi.org/10.3390/jmse9010039>
- [4] Urbański, T. *et al.* (2018) Assessment of technological usefulness of panel production line in shipbuilding process. *Polish Maritime Research*, 25(1), 134–144. <http://doi.org/10.2478/pomr-2018-0034>
- [5] Baek, S.-Y., & Nam, J.-H. (2021). Physical welding factors for reclassified welding positions in shipbuilding assembly process based on muscle activity measured by surface electromyography. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), 1211. <https://doi.org/10.3390/jmse9111211>
- [6] Jiang, X. X., Saffirna, M. S., Rejab, M. R. M., Romli, N. K., & Ma, Q. (2022). Experiment on different T-joint characteristics for laser-welded I-core galvanized steel sandwich plates. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1179–1185. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.036>
- [7] Kumar, N., Mukherjee, M., & Bandyopadhyay, A. (2017). Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam. *Optics & Laser Technology*, 94, 296–309. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.04.008>
- [8] Yurchenko, Y., Siora, O., Sokolovskyi, M., Hryn, A., Frolov, M., & Bernatskyi, A. (2025). Influence of laser welding parameters on the geometry of welded joints of thin-sheet stainless steel AISI 304. *Advances in mechanical engineering and transport*, 2(25), 87–96. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1914>
- [9] Sun, J., Feng, K., Zhang, K., Guo, B., Jiang, E., Nie, P., Huang, J., & Li, Z. (2017). Fiber laser welding of thick Aisi 304 plate in a horizontal (2G) butt joint configuration. *Materials & Design*, 118, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.015>
- [10] Chang, B., Yuan, Z., Cheng, H., Li, H., Du, D., & Shan, J. (2019). A study on the influences of welding position on the Keyhole and molten pool behavior in laser welding of a titanium alloy. *Metals*, 9(10), 1082. <https://doi.org/10.3390/met9101082>
- [11] Liu, W., & Zhang, H. (2025). Numerical Analysis of welding deformation in double T-joints of 304 stainless steel sheet. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 147(4). <https://doi.org/10.1115/1.4068496>
- [12] Chen, Q., Fei, F., Yu, S., Liu, C., Tang, J., & Yang, X. (2020). Numerical simulation of temperature field and residual stresses in stainless steel T-joint. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(3), 751–761. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01890-3>
- [13] Guerra, M., Pereira, D., Neto, J. B., Nunes, G., Sarmanho, A., & Lima, L. (2021). Structural behaviour of thin-walled CHS-RHS T-joints: Experimental and numerical assessment. *Structures*, 32, 548–561. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.008>
- [14] Pereira, D. J., Sarmanho, A. M., Nunes, G. V., Guerra, M. J., & Alves, V. N. (2019). Effect of fillet welds on t-joints with thin-walled chords. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 172(4), 301–312. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00043>
- [15] Piekarska, W., Saternus, Z., Sapieta, M., & Kopas, P. (2019). The influence of joining technique on the deformation of laser welded T-joints. *MATEC Web of Conferences*, 254, 02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925402011>

- [16] Wojsyk, K., & Nawrocki, J. (2020). Study on the impact of lack of fusion in the fillet weld on its fatigue strength under various load combinations. *Welding Technology Review*, 92(1), 17–24. <https://doi.org/10.26628/wtr.v92i1.1086>
- [17] Chen, Z., Yu, B., Wang, P., & Qian, H. (2023). Fatigue properties evaluation of fillet weld joints in full-scale steel marine structures. *Ocean Engineering*, 270, 113651. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113651>
- [18] Gu, Z., Zhu, X., Ding, Q., Duan, S., Wang, P., & Lu, X. (2023). Tensile failure analysis of laser stake-welded T-joints: X-ray tomography based conformal finite element and fractal theoretical approaches. *Engineering Failure Analysis*, 150, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107299>

© Сіора О. В., Юрченко Ю. В., Соколовський М. В., Набок Т. М., Бернацький А. В.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0