

Yurii
V. Yurchenko
Юрченко
Юрій Вікторович



Oleksandr
V. Siora
Сіора Олександр
Васильович



Mykola
V. Sokolovskyi
Соколовський
Микола
Володимирович



Taras M. Nabok
Набок Тарас
Миколайович



Artemii
V. Bernatskyi
Бернацький
Артемій
Володимирович

УДК 621.791.725

DEVELOPMENT OF LASER WELDING TECHNOLOGY FOR THIN-WALLED CYLINDRICAL PRODUCTS MADE OF 12KH18N10T STEEL

ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБІВ ЗІ СТАЛІ 12X18N10T

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2025.1\(20\).02](https://doi.org/10.15589/smi2025.1(20).02)

Yurii V. Yurchenko

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

Oleksandr V. Siora

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

Mykola V. Sokolovskyi

Соколовський Микола Володимирович,
аспірант
m_sokolovskyi@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0003-3243-5060

Taras M. Nabok

Набок Тарас Миколайович,
молод. наук. співробітник
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

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

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

Abstract. Thin-walled products with a rotation axis made of corrosion-resistant high-alloy steels play an important role in a number of industries, including shipbuilding, chemical, aviation, machine building, petrochemical, food processing and other. They are in demand due to their high strength, lightness and ability to withstand aggressive environments and high pressure. Several main methods have traditionally been used in Ukraine to produce welded joints of thin-walled products: electron beam, plasma and TIG welding. At the same time, laser welding, which has been introduced relatively recently, is becoming more widespread. It has significant advantages over other welding methods: it does not require complex vacuum chambers, provides the most localized thermal impact, has a small thermal impact zone and minimal residual deformation. However, laser welding of thin-walled products, in particular parts with a rotational axis, has not yet become widespread due to a number of unresolved technical problems. In particular, achieving the optimal thermal cycle of welding and ensuring a stable structure and properties of the welded joint require further

research. Optimizing the parameters of laser welding of thin-walled products with a rotation axis is an urgent task for Ukraine, given the current needs of applied materials science and processing technologies. The aim of this work is to investigate the fatigue strength of butt welded joints of parts with a rotation axis made of corrosion-resistant steel 12Kh18N10T, welded by laser radiation, and to study the nature of their destruction under the influence of vibration loads. During the experiments, the following laser welding parameters were chosen: laser radiation power $P = 1$ kW, welding speed $V_w = 600$ mm/min (9 rpm), laser defocusing value $\Delta F = +2$ mm. To protect the welded joint, two shielding gases were used: argon was supplied from below the welded parts at a flow rate of 14 l/min, and helium was supplied from above at a flow rate of 30 l/min. The analysis of the welded joints revealed that defects were formed during the welding process, including edge displacement and concavity of the weld root, which led to cracks. These defects, as well as residual stresses in the welding zone, negatively affected the strength of the joints. Cracks in the weld zone spread mainly from the concavity of the weld root, indicating that these joints are susceptible to fatigue failure under cyclic loads. The length of the cracks ranged from 15 to 35 mm, depending on the test specimen. In addition, the microstructural analysis revealed a significant concavity of the weld root, ranging from 0.2 to 0.58 mm in depth, which exceeds the permissible values of the technical requirements, where such concavity should not exceed 20 % of the total length of the welded joint. Also, edge displacement in the range of 0.12 to 0.3 mm was recorded, which also exceeds the technical requirements. The results of the study indicate the need to improve the laser welding process. In particular, it is proposed to optimize the process parameters and develop new technological equipment for precise joining of the edges of welded parts. This approach will help prevent defects, such as edge displacement, concavity of the weld root, and exceeding the permissible dimensions of the cast zone, which will help increase the strength and durability of welded joints of thin-walled products with a rotation axis.

Key words: thin-walled products; stainless steel; parts with a rotation axis; laser welding; problems; defects.

Анотація. Тонкостінні вироби з віссю обертання виготовлені з корозійностійких високо легованих сталей відіграють важливу роль у ряді галузей промисловості, включаючи, кораблебудівну, хімічну, авіаційну, машинобудівну, нафтохімічну, харчову та інші. Їх затребуваність зумовлена високою міцністю, легкістю та здатністю витримувати агресивні середовища і високий тиск. Для виготовлення зварних з'єднань тонкостінних виробів в Україні традиційно застосовуються кілька основних методів: електронно-променево, плазмове та ТІГ зварювання. В цей же час лазерне зварювання, яке відносно недавно почало впроваджуватися стає все більш поширеним. При цьому воно має значні переваги в порівнянні з іншими методами зварювання: не вимагає складних вакуумних камер, забезпечує найбільш локалізований термічний вплив, має малі розміри зони термічного впливу та мінімальні залишкові деформації. Проте, лазерне зварювання тонкостінних виробів, зокрема деталей з віссю обертання, досі не отримало широкого розповсюдження через низку невирішених технічних проблем. Зокрема, досягнення оптимального термічного циклу зварювання та забезпечення стабільної структури й властивостей зварного з'єднання потребують подальших досліджень. Оптимізація параметрів лазерного зварювання тонкостінних виробів з віссю обертання є актуальним завданням для України, з огляду на сучасні потреби прикладного матеріалознавства та технологій обробки. Метою роботи є дослідження втомної міцності стикових зварних з'єднань деталей з віссю обертання з корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т, зварених лазерним випромінюванням, та вивчення характеру їх руйнування під впливом вібраційних навантажень. У ході експериментів обрано наступні параметри лазерного зварювання: потужність лазерного випромінювання $P = 1$ кВт, швидкість зварювання $V_{зв} = 600$ мм/хв (9 об/хв), величина розфокусування лазерного випромінювання $\Delta F = +2$ мм. Для захисту зварного з'єднання були використані два захисні гази: аргон подавався знизу зварюваних деталей із витратою 14 л/хв, а гелій – зверху із витратою 30 л/хв. За результатами аналізу зварних з'єднань встановлено, що в процесі зварювання утворилися дефекти, зокрема зміщення крайок та увігнутість кореня шва, що призводило до появи тріщин. Ці дефекти, а також залишкові напруження у зоні зварювання, негативно вплинули на міцність з'єднань. Тріщини в зоні зварювання поширилися переважно від увігнутості кореня шва, що свідчить про схильність цих з'єднань до втомного руйнування при циклічних навантаженнях. Довжина тріщин коливається в межах від 15 до 35 мм залежно від досліджуваного зразка. Крім того, під час мікроструктурного аналізу виявлено значну увігнутість кореня шва, глибиною від 0,2 до 0,58 мм, що перевищує допустимі значення технічних

вимог, де така увігнутість не повинна перевищувати 20 % загальної довжини зварного з'єднання. Також зафіксовано зсув крайок в діапазоні від 0,12 до 0,3 мм, що також виходить за межі технічних вимог. Результати дослідження свідчать про необхідність удосконалення процесу лазерного зварювання. Зокрема, запропоновано оптимізувати параметри процесу, а також розробити нове технологічне оснащення для точного стикування крайок зварюваних деталей. Такий підхід допоможе запобігти виникненню дефектів, зокрема зміщенню крайок, увігнутості кореня шва та перевищенню допустимих розмірів литої зони, що сприятиме підвищенню міцності та довговічності зварних з'єднань тонкостінних виробів з віссю обертання.

Ключові слова: тонкостінні вироби; корозійностійка сталь; деталі з віссю обертання; лазерне зварювання; проблеми; дефекти.

References

- [1] Marić, D., Cumin, J., Šolić, T., & Samardžić, I. (2022). Quality analysis of AISI 321 welds of bellow compensators used in shipbuilding. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), 452. <https://doi.org/10.3390/jmse10040452>
- [2] Jiang, Z., Liang, D., Zhou, T., & Tong, L. (2020). Study on welding process of 7×0.5 multilayer 304 bellows and flange. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 774(1), 012084. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/774/1/012084>
- [3] Horváth, G., Körmöczi, A., Szörényi, T., & Geretovszky, Z. (2020). Laser welding and its implementation in the assembly of battery packs in aviation. *International Journal of Sustainable Aviation*, 6(1), 51. <https://doi.org/10.1504/ijsa.2020.108094>
- [4] Jha, A. K., Diwaker, V., & Sreekumar, K. (2005b). Metallurgical investigation on stainless steel bellows used in satellite launch vehicle. *Engineering Failure Analysis*, 13(8), 1437–1447. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.023>
- [5] Mankari, K., & Acharyya, S. G. (2017). Failure analysis of AISI 321 stainless steel welded pipes in solar thermal power plants. *Engineering Failure Analysis*, 86, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.12.020>
- [6] Perka, A. K., John, M., Kuruveri, U. B., & Menezes, P. L. (2022). Advanced High-Strength Steels for Automotive applications: arc and laser welding process, properties, and challenges. *Metals*, 12(6), 1051. <https://doi.org/10.3390/met12061051>
- [7] Pagano, N., Campana, G., Fiorini, M., & Morelli, R. (2016). Laser transmission welding of polylactide to aluminium thin films for applications in the food-packaging industry. *Optics & Laser Technology*, 91, 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.014>
- [8] Pandya, D., Badgujar, A., & Ghetiya, N. (2020). A novel perception toward welding of stainless steel by activated TIG welding: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(8), 877–903. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1854467>
- [9] Kurc-Lisiecka, A., & Lisiecki, A. (2020). Laser welding of stainless steel. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, 1(98), 32–40. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0815>
- [10] Sokkalingam, R., Mastanaiah, P., Muthupandi, V., Sivaprasad, K., & Prashanth, K. G. (2020). Electron-beam welding of high-entropy alloy and stainless steel: microstructure and mechanical properties. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(16), 1885–1894. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1802045>
- [11] Halder, V., Biswal, S. K., & Pal, S. (2022). Formability study of micro-plasma arc-welded AISI 316L stainless steel thin sheet joint. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(11). <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03871-7>
- [12] Guo, N., Hu, H., Tang, X., Ma, X., & Wang, X. (2023). The effect of TIG welding heat input on the deformation of a thin bending plate and its weld zone. *Coatings*, 13(12), 2008. <https://doi.org/10.3390/coatings13122008>
- [13] Lisiecki, A. (2022). Development of laser welding and surface treatment of metals. *Materials*, 15(5), 1765. <https://doi.org/10.3390/ma15051765>

- [14] Fotovvati, B., Wayne, S.F., Lewis, G., & Asadi, E. (2018). A review on Melt-Pool characteristics in laser welding of metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/4920718>
- [15] Kumar, B., Bag, S., Mahadevan, S., Paul, C., Das, C., & Bindra, K. (2021). On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 33, 158–175. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009>
- [16] Yurchenko, Yu. V., Bernatskyi, A. V., Siora, O. V., Sokolovskiy, M. V., & Bondarieva V.I. (2024). Analysis of actual problems of laser welding of stainless steel thin sheets and search for solutions. *International Journal of Science Engineering and Technology*, 12(5), 1–9. <https://doi.org/10.61463/ijset.vol.12.issue5.289>
- [17] Ai, Y., Liu, X., Huang, Y., & Yu, L. (2020). Numerical analysis of the influence of molten pool instability on the weld formation during the high speed fiber laser welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160, 120103. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120103>
- [18] Wang, K., Shao, C., Jiao, X., Zhu, J., Cai, Z., & Li, C. (2021). Investigation on Microstructure and Properties of Duplex Stainless Steel Welds by Underwater Laser Welding with Different Shielding Gas. *Materials*, 14(17), 4774. <https://doi.org/10.3390/ma14174774>
- [19] Schaefer, M., Kessler, S., Scheible, P., Speker, N., & Harrer, T. (2017). Hot cracking during laser welding of steel: influence of the welding parameters and prevention of cracks. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 10097, 100970E. <https://doi.org/10.1117/12.2254424>
- [20] Jayanthi, A., Venkatramanan, K., & Kumar, K. S. (2019). An investigation on laser induced downward expanded vapour region in laser weld butt joint of AISI 316L stainless steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 574(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/574/1/012020>
- [21] Liu, S., Mi, G., Yan, F., Wang, C., & Jiang, P. (2017). Correlation of high power laser welding parameters with real weld geometry and microstructure. *Optics & Laser Technology*, 94, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.03.004>

Постановка задачі. Тонкостінні циліндричні вироби з корозійностійких сталей, широко використовуються для ряду галузей, включаючи кораблебудівну [1–2], хімічну, авіаційну та ракето-космічну [3–4], енергетичну [5], машинобудівну [6], нафтохімічну та харчову промисловості [7]. Такі вироби використовуються через їх високу міцність, малу вагу і здатність витримувати тиск та агресивні середовища. В кораблебудівній промисловості корозійностійкі сталі використовуються для виготовлення сильфонних компенсаторів, трубопроводів та інших виробів [1–2]; для хімічної та нафтохімічної промисловості виготовляють цистерни, баки, трубопроводи [8]. Для виготовлення тонкостінних виробів зазвичай використовують такі методи зварювання, як лазерне [9], електронно-променеве [10], мікроплазмове [11], TIG зварювання [12]. На даний момент в Україні близько 80 % зварних з'єднань тонколистових матеріалів виконуються саме цими способами. Відносно нещодавно почало впроваджуватися лазерне зварювання, яке має суттєві переваги, такі

як: не вимагає складних вакуумних камер, забезпечує найбільш локалізований термічний вплив, має малі розміри зони термічного впливу та мінімальні залишкові деформації [13–14]. Однак, наразі лазерне зварювання тонкостінних виробів, в тому числі з віссю обертання, в Україні не набуло широкого поширення через недостатню визначеність оптимальних термічних циклів процесу і їх впливу на структуру і властивості зварних з'єднань та ЗТВ. Тому вдосконалення технологічних підходів до лазерного зварювання таких виробів є актуальним завданням для України в контексті сучасних проблем прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як вже зазначалося раніше, лазерне зварювання стає все більш широко використовуваним процесом для з'єднання тонколистових матеріалів. Але незважаючи на велику кількість переваг лазерного зварювання, існують також ряд проблем при зварюванні тонкостінних виробів. До однієї з проблем можна віднести залишкові на-

пруження, які виникають після зварювання. Також було виявлено, що й мікроструктура зварного з'єднання впливає на залишкові напруження. У роботі [15] підтверджується взаємозв'язок залишкових напружень з мікроструктурою. При низькому тепловому вкладенні (45 Дж/мм) у зварному з'єднанні зі сталі AISI 304 формується подвійна фаза з дрібнозернистим δ -феритом і аустенітною матрицею, що забезпечує високі механічні властивості і знижує залишкові напруження. Збільшення теплового вкладення (до 75 Дж/мм) призводить до зниження вмісту δ -фериту та збільшення товщини дендритів, що сприяє розвитку стискаючих напружень. Це також впливає на розподіл напружень, перетворюючи поздовжні напруження зі стискаючих на розтягувальні.

Ще однією проблемою є проблема стикування кромek зварюваних деталей. При недостатній точності стикування зварюваних поверхонь, можливе утворення зазорів, які можуть сприяти утворенню несплавлення та зниженню міцності зварного з'єднання [16].

Нестабільність процесу лазерного зварювання тонкостінних виробів також є однією з проблем які потребують вирішення. На основі аналізу результатів розрахунків показано [17], що значне збільшення довжини розплавленої ванни під час високошвидкісного лазерного зварювання та релєївська нестійкість, що виникає при цьому, є основними факторами формування нестабільної динаміки ванни розплаву. Хвиля коливань в розплавленій ванні, викликана сильним тиском віддачі і силою зсуву парового факела, а також раннє затвердіння зварювальної ванни є основними факторами утворення зварювальних дефектів.

Захисний газ, який використовується в процесі лазерного зварювання також суттєво впливає на формування мікроструктури зварного з'єднання, його механічні властивості та корозійну стійкість. В дослідженні [18] було виявлено, що додавання азоту в захисний газ збільшує вміст аустеніту в зоні зварювання на 51,6 %, проте, не змінює основних фазових перетворень ферит-аустеніт при зварюванні сталі S32101. Це

не покращує міцність з'єднання, оскільки основний метал залишається частиною з'єднання з найменшою міцністю. Випаровування азоту в зварювальній ванні може призводити до утворення інтерметалідних фаз, таких як Fe-Cr, що знижує ударну в'язкість. Проте, азот позитивно впливає на мікроструктуру та корозійну стійкість, покращуючи стійкість до точкової корозії, хоча зона термічного впливу все ще має погану корозійну стійкість через осадження нітридів хрому.

Підбір параметрів зварювання, також грає велику роль у отриманні якісних бездефектних зварних з'єднань. Через велике теплове вкладення можливе утворення прожогів під час зварювання тонкостінних деталей. Також можливе утворення гарячих тріщин. Сильна періодичність утворення тріщин була виявлена на рентгенівських знімках і сигналі коливання каналу проплавлення (так званий «keyhole») – обидва з однаковою частотою [19]. Отже, існує взаємна взаємодія між енергією, що вводиться в канал проплавлення, утвореними при цьому вихорами потоку розплаву, зміною геометрії зварювальної ванни, що впливає на величину термоіндукованих напружень і деформацій та, як наслідок, на гаряче тріщиноутворення. Це дає підстави припустити, що за допомогою впливу на динаміку каналу проплавлення можна достатньо сильно впливати на процес, щоб повністю запобігти утворенню гарячих тріщин.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. З вищеперерахованих проблем лазерного зварювання, необхідно виділити дві основні, які знижують надійність зварного з'єднання, а саме: залишкові напруження, що виникають після зварювання та недостатня точність стикування зварюваних поверхонь. Ці проблеми є критичними про зварюванні таких виробів як сильфонні компенсатори та інші циліндричні вироби, які використовуються в кораблебудівній промисловості. Так як циклічні або вібраційні навантаження в поєднанні з цими двома проблемами, слугують швидкому руйнуванню зварних з'єднань.

Мета дослідження. Метою даної роботи є дослідження втомної міцності при вібраційних навантаженнях та визначення характеру руйнування тонкостінних стикових зварних з'єднань деталей з віссю обертання зі сталі 12X18H10T, одержаних лазерним зварюванням.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Зварювали стикові з'єднання деталей з віссю обертання. Деталі, що зварювалися, являли собою трубу діаметром 22 мм з товщиною стінки 1 мм та сферичний ніпель. Схема лазерного зварювання стикового з'єднання показана на рисунку 1.

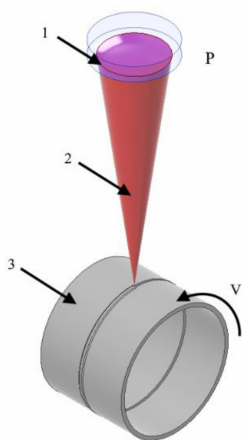


Рис. 1. Схема лазерного зварювання, де 1 – лінза, 2 – лазерне випромінювання, 3 – деталі, що зварювалися

У якості матеріалів цих двох деталей, що зварювалися (сферичного ніпеля та труби), використовували сталь 12X18H10T. Сталь 12X18H10T – корозійностійка високолегована хромонікелетитанова 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 12X18H10T наведений у таблиці 1.

У експериментах був використаний Nd:YAG-лазер «DY044» з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм, виробництва фірми «Rofin-Sinar» (виробництва Німеччини).

У ході експериментів обрано наступні параметри лазерного зварювання: потужність лазерного випромінювання $P = 1$ кВт, швидкість зварювання $V_{\text{зв}} = 600$ мм/хв (9 об/хв), величина розфокусування лазерного випромінювання $\Delta F = +2$ мм. В якості захисного газу було обрано 2 гази, аргон та гелій, які подавалися знизу та зверху зварюваних деталей відповідно. Витрата газу при цьому становила для аргону 14 л/хв, для гелію – 30 л/хв.

Після зварювання зразки були випробувані на опір втомній міцності при вібраційних навантаженнях комбінованим методом. Для цього зразки препарувалися дрововими терморезисторами типу 5ПЗ з базою 5 мм, згідно схеми препарування представленій на рисунку 2.

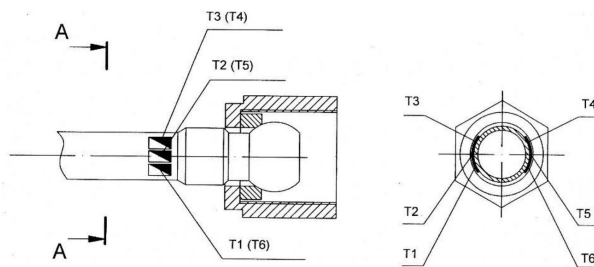


Рис. 2. Схема препарування зразків, закінцівка сферичний ніпель

Для попередньої оцінки рівнів меж витривалості перша партія одержаних зварних з'єднань випробовувалася методом ступеневого підвищення напружень до руйнування. Під час цього випробування ступінь підвищення напружень становила до $\Delta\sigma = 2$ кгс/мм², а також початкові рівні навантаження призначалися індивідуально.

Для остаточного визначення меж витривалості зразків для ймовірності неруйнування $Q = 0,95$ випробування продовжувалися стандартним методом «на рівнях». Згідно з вимогами збірки зусилля затиснення для

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 12X18H10T, згідно ГОСТ 5632–72.

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	основ.

одержаних зварних з'єднань становило 6 кгс/м. Випробування проводилися в умовах кімнатної температури під час згинальних коливань за основним тоном із симетричним циклом навантаження за базового числа циклів $N_0 = 10^7$.

Після проведення випробувань на втомну міцність всі зразки зварних з'єднань були направлені на металографічні дослідження. Аналіз будови зламів розкритих тріщин проводили за допомогою бінокулярного мікроскопа при збільшенні $\times 25$. Мікроструктура була досліджена за допомогою оптичного мікроскопа OLYMPUS IX70 при збільшеннях $\times 50 \dots \times 100$.

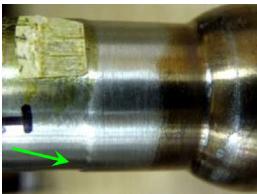
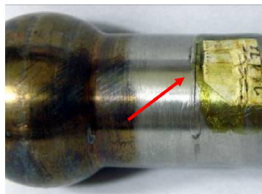
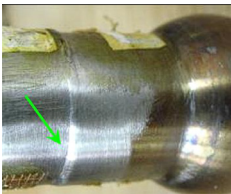
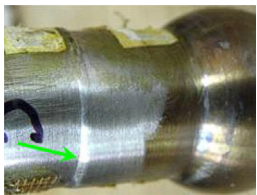
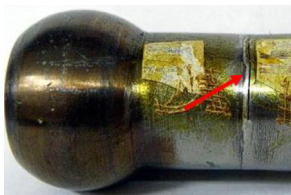
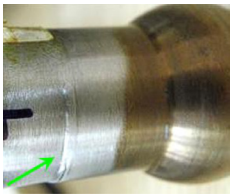
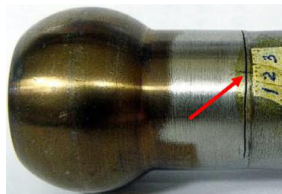
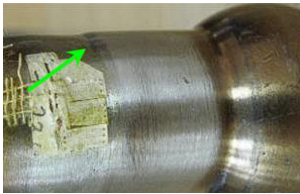
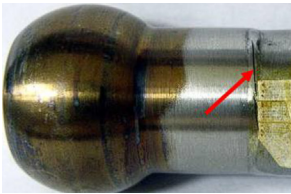
Основний матеріал. За результатами досліджень втомної міцності при вібраційних навантаженнях з різними рівнями напружень від 10 до 20 кгс/мм² були отримані наступні результати (табл. 1).

Таблиця 1. Параметри та результати випробувань зразків

№	σ , кгс/мм ²	f , Гц	N , циклів	Результат
1	10	322	$1,25 \times 10^6$	руйнування
2	14, 16, 18, 20	331	10^7 $6,9 \times 10^5$	без руйнування руйнування
3	10, 12, 14, 16	334	10^7 $8,76 \times 10^5$	без руйнування руйнування
4	14	329	$1,67 \times 10^6$	руйнування
5	10, 12, 14	321	10^7 $2,88 \times 10^6$	без руйнування руйнування

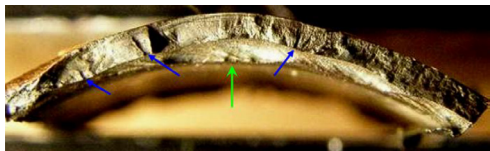
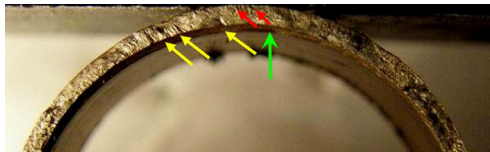
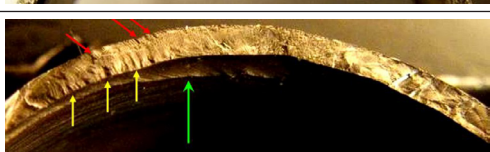
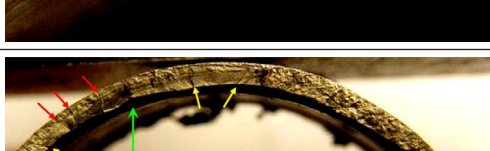
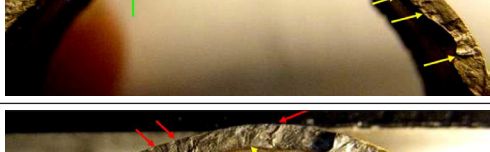
Під час візуального огляду виявлено, що зварювання ніпелів і трубок усіх зразків виконано зі зміщенням крайок. Руйнування всіх зразків відбулося по зварному шву. Тріщини проходять через зону підварювання. Довжина тріщин становить: на зразках №№ 1, 3, 5 – ~ 15 мм; № 2 – 35 мм; № 4 – 27 мм. (табл.2).

Таблиця 2. Результати візуального огляду зразків

№	Зміщення кромки	Руйнування	Довжина тріщини, мм
1			~ 15
2			35
3			~ 15
4			27
5			~ 15

Під час аналізу будови зламів розкритих тріщин встановлено, що руйнування всіх зразків носить втомний характер, з початком розвитку від лінійних осередків. На зразку № 1 тріщина розвивалася від внутрішньої поверхні (Табл. 3, осередки вказані стрілками). На зразках №№ 2, 3, 4, 5 відзначається двосторонній розвиток руйнування з перевагою також від внутрішньої поверхні. Слід зазначити, що на всіх зразках тріщини мають початок розвитку від увігнутості кореня шва (у табл. 3 увігнутість вказана зеленими стрілками).

Таблиця 3. Злами розкритих тріщин зразків

№ зразка	Злами розкритих тріщин
1	
2	
3	
4	
5	

Для підтвердження місця руйнування (по зварному шву або основному матеріалу деталей), було виконано мікроаналіз у поперечному перерізі зварних з'єднань, у зонах, що перетинають осередки в зламах.

При цьому встановлено, що руйнування всіх зразків відбулося безпосередньо по звар-

ному з'єднанню (рис. 3, місце руйнування вказано стрілками). У зв'язку з цим, перевірити геометричні параметри зварного з'єднання в зоні руйнування на відповідність вимогам не було можливим. Дослідження мікроструктури зламів розкритих тріщин показало, що дефекти зварювання відсутні.

Контроль якості зварювання зразків проводився в місцях, де збереглася геометрія швів (у зонах, протилежних тріщинам). Металографічним контролем перевірено розміри зварних з'єднань, а також наявність (відсутність) внутрішніх дефектів у матеріалі стикових з'єднань на відповідність технічним вимогам до таких з'єднань. При цьому встановлено, що в корені зварного шва всіх зразків є увігнутість глибиною від 0,2 до 0,58 мм, що перевищує 5 % товщини металу, що зварюється (1 мм), і є неприпустимим згідно технічних вимог до таких з'єднань. Ця увігнутість має місце практично по всій протяжності швів, що також є неприпустимим відхиленням (згідно технічних вимог до таких з'єднань – не більше 20 %). На зразках №№ 1,2,3,5 спостерігається зсув зварюваних крайок. від 0,12 (на зразку № 3) до ~0,3 мм (на зразках 1, 2, 5) (табл. 4). Ширина литої зони на всіх зразках перевищує допустиму і становить 1,18–1,84 мм при вимогах $d_c = 1,1$ мм.

Дефекти зварних з'єднань у вигляді пор, раковин, шлакових та інших включень, а також мікротріщин не виявлено. Величина зерна матеріалу труби відповідає 10-му балу, матеріалу ніпеля – 8 балу шкали ГОСТ 5639-82 як біля зварного з'єднання, так і в основному матеріалі (рис. 4).

Обговорення отриманих результатів. Під час візуального та металографічного аналізу зразків зварювання ніпелів і труб було виявлено низку суттєвих дефектів, які впливають на міцність і довговічність з'єднань. Усі зразки мали зміщення крайок, що стало причиною руйнування саме по зварному шву. Тріщини виявлялися в зоні зварювання і поширювалися в основному від увігнутості кореня шва, що свідчить про схильність з'єднань до втомного руйнування. Довжина тріщин варіювалася залежно від зразка, досягаючи від 15 до 35 мм.

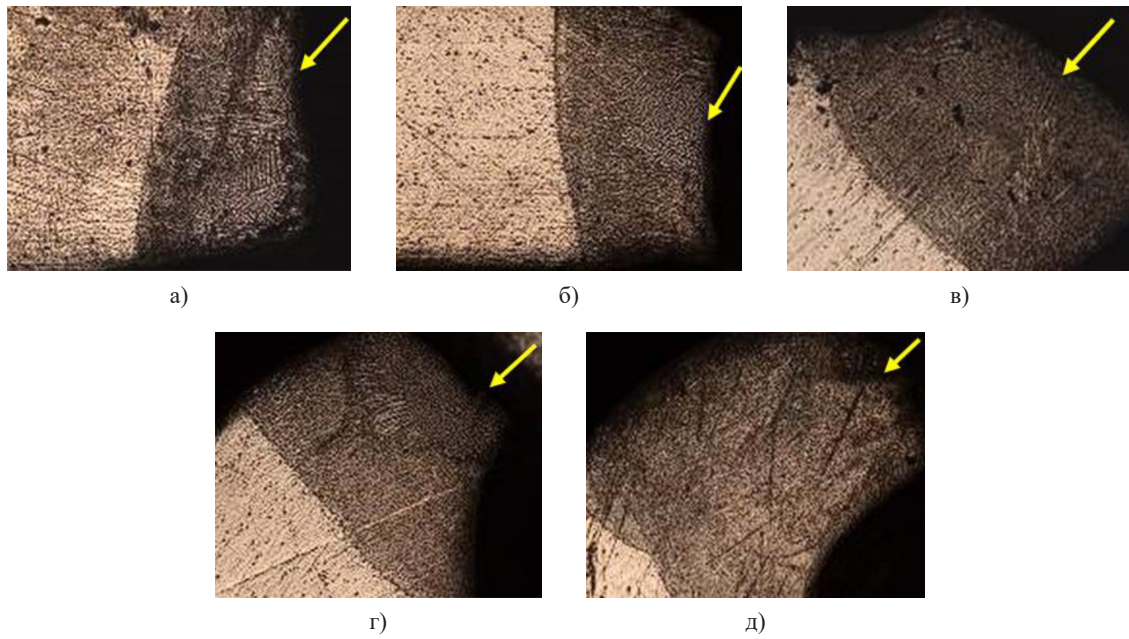
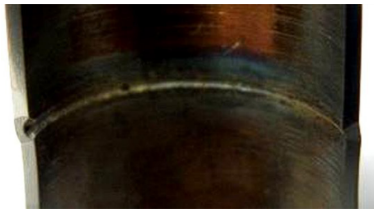
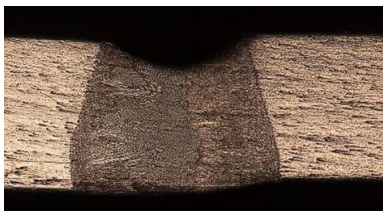
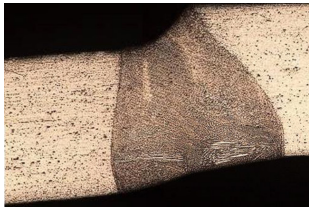


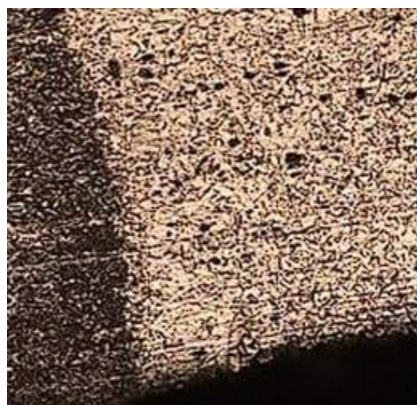
Рис. 3. Зони руйнування зварних з'єднань зразків: а) № 1, б) № 2, в) № 3, г) № 4, д) № 5

Таблиця 4. Макро- і мікроструктура зварних з'єднань зразків

№	Макроструктура	Мікроструктура	Величина зсуву, мм
1			~0,3
2			~0,3
3			0,12
4			-
5			~0,3



а)



б)

Рис. 4. Мікроструктура матеріалів: а) – ніпеля; б) – труби

При мікроструктурному аналізі виявлено, що дефекти зварювання відсутні, але на всіх зразках спостерігалася значна увігнутість у корені шва глибиною від 0,2 до 0,58 мм, що перевищує допустимі значення згідно технічних вимог до таких з'єднань. Ця увігнутість простежується майже по всій довжині зварних швів, що є порушенням технічних вимог до таких з'єднань, де допуск становить не більше 20 % загальної довжини шва.

Окрім цього, зафіксовано зсув крайок, який варіювався від 0,12 до 0,3 мм, що також виходить за межі технічних вимог до таких з'єднань. Ширина литої зони на всіх зразках перевищувала допустиму (1,18–1,84 мм замість 1,1 мм). Мікроструктура матеріалів з'єднань виявилася задовільною; спектральний аналіз підтвердив відповідність сталі 12X18H10T, із зернистістю 10-го балу для труби та 8-го балу для ніпеля.

Для усунення вищеперелічених дефектів зварного з'єднання, багатьма дослідниками вже були прийняті міри, щодо можливості їх усунення. В роботі [20] досліджено утворення такого дефекту, як увігнутість кореня зварного з'єднання. Виявилося, що цей дефект спричинений усадкою більшої зварювальної ванни через надлишкову вхідну потужність лазерного випромінювання у напрямку товщини зварного з'єднання. Для усунення такого дефекту, як автори рекомендують контролювати формування області випаровування зварюваного металу, шляхом оптимізації робочих параметрів, таких як потужність лазерного випромінювання та швидкість зварювання.

Перевищення допустимого розміру литої зони спричинене збільшенням енергії лазер-

ного випромінювання, при цьому конвекція Марангоні, зумовлена поверхневим натягом, стає сильнішою, що значно прискорює потік металу розширюючи зварювальну ванну [21]. Автори дослідження також рекомендують оптимізувати потужність і швидкість зварювання для усунення даного дефекту.

Усунення зміщення зварюваних кромок деталей з віссю обертання можна досягти шляхом розробки нового технологічного устаткування, яке б дозволило більш точно відцентровувати та стикувати кромки зварюваних деталей між собою.

Висновки. Недотримання геометричних параметрів зварного з'єднання, зокрема надмірна увігнутість кореня шва (0,2–0,58 мм при допустимих ≤ 5 % товщини), зміщення крайок (0,12–0,3 мм) і перевищення ширини литої зони (1,18–1,84 мм замість 1,1 мм), значно знижує надійність і стійкість зварних з'єднань, що підтверджується втомним характером руйнувань на зразках. Результати вказують на необхідність удосконалення методів контролю та коригування технологічного процесу лазерного зварювання для мінімізації таких відхилень, що потенційно підвищить надійність з'єднань і їхню витривалість. З огляду на отримані результати, подальші дослідження доцільно зосередити на оптимізації параметрів лазерного зварювання, а також розробці нового технологічного устаткування для точного складання зварюваних кромок зварюваних деталей з віссю обертання. Дані кроки повинні підвищити якість зварних з'єднань та усунути такі дефекти, як зміщення кромок, увігнутість кореня шва, перевищення литої зони зварного з'єднання та ін.

Список літератури

- [1] Marić D., Cumin J., Šolić T., Samardžić I. Quality analysis of AISI 321 welds of bellow compensators used in shipbuilding. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(4), 452. <https://doi.org/10.3390/jmse10040452>
- [2] Jiang Z., Liang D., Zhou T., Tong L. Study on welding process of 7×0.5 multilayer 304 bellows and flange. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, 774(1), 012084. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/774/1/012084>
- [3] Horváth G., Körmöcz A., Szörényi T., Geretovszky Z. Laser welding and its implementation in the assembly of battery packs in aviation. *International Journal of Sustainable Aviation*, 2020, 6(1), 51. <https://doi.org/10.1504/ijsa.2020.108094>
- [4] Jha A. K., Diwaker V., Sreekumar K. Metallurgical investigation on stainless steel bellows used in satellite launch vehicle. *Engineering Failure Analysis*, 2005b, 13(8), 1437–1447. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.023>
- [5] Mankari K., Acharyya S. G. Failure analysis of AISI 321 stainless steel welded pipes in solar thermal power plants. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 86, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.12.020>
- [6] Perka A. K., John M., Kuruveri U. B., Menezes P. L. Advanced High-Strength Steels for Automotive applications: arc and laser welding process, properties, and challenges. *Metals*, 2022, 12(6), 1051. <https://doi.org/10.3390/met12061051>
- [7] Pagano N., Campana G., Fiorini M., Morelli R. Laser transmission welding of polylactide to aluminum thin films for applications in the food-packaging industry. *Optics & Laser Technology*, 2016, 91, 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.014>
- [8] Pandya D., Badgujar A., Ghetiya N. A novel perception toward welding of stainless steel by activated TIG welding: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, 36(8), 877–903. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1854467>
- [9] Kurc-Lisiecka A., Lisiecki A. Laser welding of stainless steel. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, 2020, 1(98), 32–40. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0815>
- [10] Sokkalingam R., Mastanaiah P., Muthupandi V., Sivaprasad K., Prashanth K. G. Electron-beam welding of high-entropy alloy and stainless steel: microstructure and mechanical properties. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, 35(16), 1885–1894. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1802045>
- [11] Halder V., Biswal S. K., Pal S. Formability study of micro-plasma arc-welded AISI 316L stainless steel thin sheet joint. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, 44(11). <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03871-7>
- [12] Guo N., Hu H., Tang X., Ma X., Wang X. The effect of TIG welding heat input on the deformation of a thin bending plate and its weld zone. *Coatings*, 2023, 13(12), 2008. <https://doi.org/10.3390/coatings13122008>
- [13] Lisiecki A. Development of laser welding and surface treatment of metals. *Materials*, 2022, 15(5), 1765. <https://doi.org/10.3390/ma15051765>
- [14] Fotovvati B., Wayne S. F., Lewis G., Asadi E. A review on Melt-Pool characteristics in laser welding of metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/4920718>
- [15] Kumar B., Bag S., Mahadevan S., Paul C., Das C., Bindra K. On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 33, 158–175. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009>
- [16] Yurchenko Yu. V., Bernatskyi A. V., Siora O. V., Sokolovskyi M. V., Bondarieva V. I. Analysis of actual problems of laser welding of stainless steel thin sheets and search for solutions. *International Journal of Science Engineering and Technology*, 2024, 12(5), 1–9. <https://doi.org/10.61463/ijset.vol.12.issue5.289>
- [17] Ai Y., Liu X., Huang Y., Yu L. Numerical analysis of the influence of molten pool instability on the weld formation during the high speed fiber laser welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 160, 120103. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120103>
- [18] Wang K., Shao C., Jiao X., Zhu J., Cai Z., Li C. Investigation on Microstructure and Properties of Duplex Stainless Steel Welds by Underwater Laser Welding with Different Shielding Gas. *Materials*, 2021, 14(17), 4774. <https://doi.org/10.3390/ma14174774>

- [19] Schaefer M., Kessler S., Scheible P., Speker N., Harrer T. Hot cracking during laser welding of steel: influence of the welding parameters and prevention of cracks. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 2017, 10097, 100970E. <https://doi.org/10.1117/12.2254424>
- [20] Jayanthi A., Venkatramanan K., Kumar K. S. An investigation on laser induced downward expanded vapour region in laser weld butt joint of AISI 316L stainless steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, 574(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/574/1/012020>
- [21] Liu S., Mi G., Yan F., Wang C., Jiang P. Correlation of high power laser welding parameters with real weld geometry and microstructure. *Optics & Laser Technology*. 2017. 94. 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.03.004>

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

Дата надходження статті до редакції: 21.02.2025

Дата затвердження статті до друку: 03.02.2025