

УДК 621.791.7:620.18:669.14

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-18>

МІКРОСТРУКТУРА ЗВАРНОГО ШВА ТА ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ АРМУВАЛЬНИХ ПРОФІЛІВ З КИПЛЯЧИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри металургії та організації виробництва,
проректор з науково-дослідної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

Бойко Ігор Олександрович,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри матеріалознавства та прикладної механіки
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0001-7742-4694

Пашинський Володимир Вікторович,

доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри матеріалознавства та прикладної механіки
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-0118-4748

Циміданов Денис Владиславович,

директор ПП «ДАНВІС»

У статті подано результати дослідження мікроструктури зварного шва та зони термічного впливу (ЗТВ) профільних елементів з киплячих сталей після лазерного зварювання. Лазерне зварювання є перспективною альтернативою традиційним методам завдяки високій концентрації енергії, малій тривалості процесу та можливості забезпечення якісного з'єднання на високих швидкостях. Водночас визначення оптимальних параметрів режиму зварювання потребує експериментальних досліджень, що можна прискорити за рахунок аналізу макро- та мікроструктури. У роботі використано хімічний аналіз основного металу та металографічні методи дослідження. Встановлено, що у зразках товщиною 1,2 мм зона сплавлення характеризується чіткою дендритною структурою шириною 2–3 мм, яка розширюється до поверхні профілю. ЗТВ зберігає дрібнозернисту структуру без істотного зростання зерна завдяки високій швидкості тепловідведення. У профілях товщиною 2 мм виявлено оксидні неметалеві включення, що спричиняють нестабільність процесу та інтенсифікацію розбризкування. Встановлено, що за відсутності захисної атмосфери окислення розплавленого металу супроводжується виникненням кратерів і поверхневих дефектів. Доведено, що низький вміст Si та Mn у киплячій сталі зумовлює підвищену кількість неметалевих включень та утворення оксидних дефектів. Для забезпечення стабільності процесу та підвищення якості зварних з'єднань рекомендовано використовувати сталь із вмістом Si $\geq 0,1$ % та Mn $\geq 0,3$ % за мінімальної вмісту S і P. Отримані результати мають практичне значення для виробництва профільних труб і армувальних елементів, де критичною є якість зварного шва.

Ключові слова: лазерне зварювання, зварний шов, зона термічного впливу, мікроструктура, дендритна кристалізація, неметалеві включення, стабільність процесу.

Kukhar Volodymyr, Boiko Ihor, Pashynskyi Volodymyr, Tsymidanov Denys. Microstructure of welded joint and heat-affected zone of reinforcing profiles made of rimmed steels after laser welding

The paper presents the results of studying the microstructure of the weld metal and the heat-affected zone (HAZ) of reinforcing profiles made of rimmed steels after laser welding. Laser welding is considered a promising alternative to conventional methods due to its high energy concentration, short process duration, and ability to ensure high-quality joints at elevated welding speeds. However, determining optimal process parameters requires experimental studies, which can be accelerated by applying macro- and microstructural analysis. Chemical composition analysis of the base metal and metallographic investigations were conducted. It was established that in specimens with a thickness of 1.2 mm, the fusion zone exhibits a distinct dendritic structure with a width of 2–3 mm, widening towards the outer surface of the profile. The HAZ retains a fine-grained structure without significant grain growth, owing to rapid heat dissipation. In 2 mm profiles, oxide non-metallic inclusions were detected, which reduce

process stability and intensify spattering. In the absence of shielding gas, oxidation of the molten pool was found to cause crater formation and surface defects. The study demonstrates that low Si and Mn content in rimmed steels leads to an increased number of non-metallic inclusions and oxide-related imperfections. To ensure process stability and improve weld quality, it is recommended to use steels with Si $\geq$ 0.1 % and Mn $\geq$ 0.3 % at minimum sulfur and phosphorus levels. The obtained results are of practical importance for the production of profile tubes and reinforcing elements where weld integrity is critical.

Key words: laser welding, welded joint, heat-affected zone, microstructure, dendritic crystallization, non-metallic inclusions, process stability.

Вступ. Технологія лазерного зварювання широко використовується в промисловості для отримання надійного з'єднання матеріалів різного хімічного складу та діапазону геометричних розмірів [1]. Особливо ефективним цей процес є під час зварювання тонких матеріалів, створення зварного з'єднання в металевих композитах, високошвидкісного зварювання на автоматичних лініях [2].

Як показано в роботі [3], основною особливістю процесу лазерного зварювання є висока концентрація енергії в малих об'ємах матеріалу та, відповідно, мала тривалість самого процесу зварювання. Це дає змогу знизити термічний вплив процесу зварювання на структурні зміни в основному металі, запобігає надлишковому розвитку дифузійних процесів у зоні зварного шва, гальмує небажані процеси окислення. Водночас жорсткий термічний цикл зварювання приводить до генерації значних механічних напружень і може супроводжуватися появою тріщин, пор, непроварів. Тому для отримання високоякісного з'єднання необхідне проведення експериментальних робіт для визначення оптимальних параметрів процесу для конкретних матеріалів та особливостей технології.

Автори роботи [4] порівнювали мікроструктуру та властивості зварних з'єднань, отриманих методами електродугового та лазерного зварювання з використанням порошкового дроту. Згідно з даними авторів, технологія лазерного зварювання завдяки високій концентрації енергії дала змогу прискорити процес зварювання приблизно в 1,5 рази, а швидка теплопередача тепла із зони зварювання в основний метал завдяки високому градієнту температур привела до розвитку мартенситного перетворення в матеріалі шва. Це привело до значного збільшення твердості матеріалу шва.

Оскільки таке зміцнення не завжди є бажаним і може супроводжуватися зниженням пластичності матеріалу, низка авторів пропонує поєднувати процес лазерного зварювання з додатковою термічною обробкою зони шва. Зокрема, в роботі [5] було застосовано індукційну термічну обробку для вирішення проблеми недостатньої пластичності та локалізованої корозійної стійкості зварних швів плакованих пластин

з нержавіючої сталі Q235/304 товщиною (10 + 3) мм, зварних швів, виконаних за допомогою однопрохідного гібридного лазерно-дугового зварювання високої потужності. Встановлено, що після індукційної термічної обробки за 750–950 °C розкладання δ -фериту на вторинний аустеніт та карбіди $M_{23}C_6$ зменшило концентрацію напружень та утворення тріщин на межі розділу фаз δ -ферит/аустеніт, що значно покращило пластичність зварного шва. Одночасно стійкість зварних швів до локалізованої корозії покращувалася зі збільшенням температури індукційного нагріву. Проте очевидно, що така технологія є більш складною і потребує спеціалізованого устаткування.

Тому більшість авторів зосереджується на пошуку можливості отримання високоякісного зварного з'єднання за рахунок регламентації енергетично-часових параметрів основного процесу лазерного зварювання. В роботі [6] показано, що підвищення швидкості зварювання обмежено через виникнення дефектів процесу, як-от підрізи. Тому було запропоновано цілеспрямоване введення енергії за допомогою формування променю з регульованою інтенсивністю розподілу енергії. Для різних розподілів потужності лазера, що формує шов, та кільцевого лазера було знайдено параметри, які забезпечували високу якість з'єднання за одночасного збільшення швидкості зварювання. Однак реалізація такого підходу потребує розроблення складної оптичної системи встановлення лазерного зварювання.

В роботі [7] задачу регулювання теплового стану зони зварювання було запропоновано вирішити за рахунок зміщення лазерного променю від осі шва в бік одного з матеріалів. Незважаючи на те, що для випадку зварювання різномірних матеріалів авторам вдалося знайти рішення, зрозуміло, що цей метод не є достатньо гнучким і буде працювати тільки для конкретних комбінацій матеріалів.

В роботі [8] досліджувався вплив різних швидкостей зварювання на морфологію розплавленої ванни та корозійну стійкість зварного шва. Регульованими параметрами були потужність лазера, швидкість зварювання та відстань розфокусування. Встановлено, що підвищення

швидкості зварювання подрібнює структуру зварного шва, запобігає формуванню δ -фериту та карбідів хрому. Це, в свою чергу, покращує корозійну стійкість шва.

Автори роботи [9] також досліджували вплив таких параметрів зварювання, як потужність лазера, швидкість зварювання та фокальне положення на глибину проникнення, ширину шва та висоту підсилення шва під час зварювання різнорідних матеріалів (сталь CLF-1 та 316LN-IG). Основна увага в цій роботі була зосереджена на оптимізації ключових параметрів процесу для забезпечення цілісності зварних з'єднань та механічних характеристик. Встановлено, що залежність параметрів шва від параметрів процесу є нелінійною і має точки екстремумів, тому для досягнення необхідних результатів потрібно вирішувати завдання оптимізації. За оптимізованих параметрів зварювання було отримано високоякісне лазерне зварне з'єднання різнорідних сталей CLF-1/316LN-IG товщиною 10 мм відповідно до критеріїв прийнятності зварного шва. Проте процес оптимізації виходячи тільки з критеріїв геометрії зварного шва не завжди дає змогу отримати необхідний комплекс характеристик зварного з'єднання.

В роботі [10] для досягнення надійності з'єднання між чавуном та сталлю експериментально досліджували мікроструктуру, розподіл елементів та властивості міжфазної поверхні лазерно-звареного металу та будову зони термічного впливу різнорідних з'єднань. Основна інформація для удосконалення процесу була отримана саме з аналізу мікро- та макроструктури зони зварного шва.

З аналізу літературних даних випливає, що технологія лазерного зварювання часто дає змогу досягти необхідної якості з'єднання за високої швидкості процесу за рахунок визначення необхідних технологічних параметрів процесу. Але її визначення потребує експериментальних досліджень для кожного конкретного випадку. Прискорити і здешевити процес експериментального визначення параметрів можна з використанням аналізу макро- та мікроструктури зварного з'єднання. Це дасть змогу отримати важливу інформацію про перебіг процесу і скоротити об'єм експериментальних досліджень.

Матеріали та методика дослідження.

Визначення хімічного складу основного металу проводилося оптико-емісійним приладом SpectroMax.

Цикл металографічних досліджень проводився за допомогою металографічного

мікроскопа ММО-1600 ВАТ, цифрової камери Sigeta 10Мп та програми для обробки зображень TourView.

Завчасно підготовлені зразки для металографічних досліджень вирізались за допомогою стрічкової пили, шліфувались та заливались епоксидною смолою. Після повного затвердіння зразки шліфувались та відполіровувались за допомогою пробопідготовчої полірувальної машини.

Оберти диску – 300–350 об/хв. На полірувальну тканину Akasel Aka-Napal подавалася суспензія гідроколоїдного оксиду алюмінію. Після полірування зразки промивалися 96 % етиловим спиртом, висувувалися на повітрі, далі проводились петрографічні дослідження. Зразок травився за допомогою 4 % розчину азотної кислоти HNO_3 в етиловому спирті.

Результати. Поперечні перетини зразків зварних з'єднань профільних труб під мікроскопом наведені на рис. 1 та рис. 2.

Як видно з рис. 1 та 2, зварні шви мають різну геометрію. На трубі $40 \times 60 \times 1,2$ спостерігається

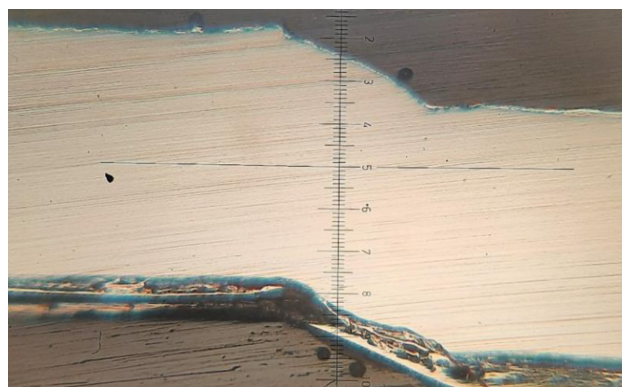


Рис. 1. Поперечний перетин шва профілю (труби) $40 \times 60 \times 1,2$ ($\times 80$)

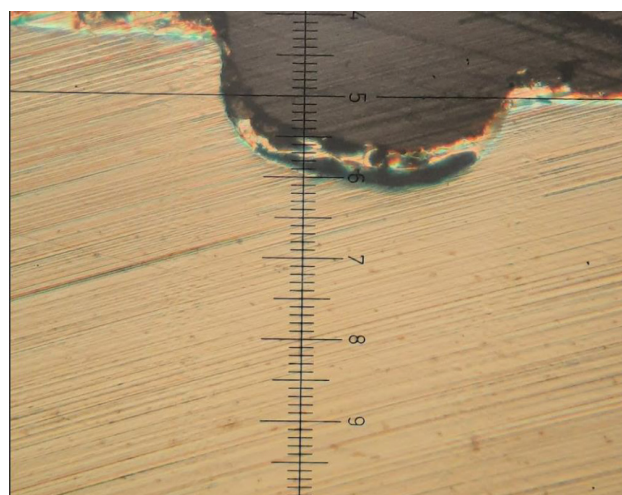


Рис. 2. Поперечний перетин шва труби $80 \times 60 \times 2$ ($\times 200$)

зміщення кромки на 0,25–0,3 мм, немає різновтовщинності шва і основного металу (рис. 1). Труба $80 \times 60 \times 2$ має шов, який не заповнений до товщини труби на 0,4 мм.

Наявність неметалевих включень (рис. 3) в основному металі (строчених оксидів) може сприяти погіршенню стабільності процесу лазерного зварювання, що буде проявлятися у підвищеному розбризкуванні.

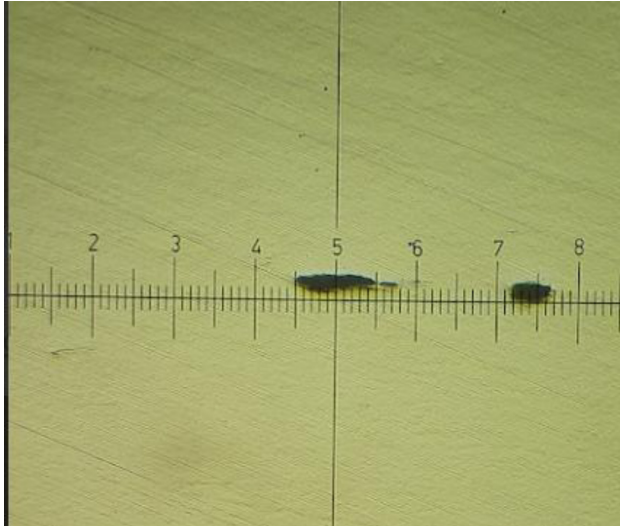


Рис. 3. Неметалеві включення в основному металі ($\times 200$)

Під час потрапляння крупних оксидних неметалевих включень у реакційну зону зварювання відбувається їх миттєва дисоціація, за якої вивільнений кисень вступає в реакцію з металом зварювальної ванни. При цьому можуть утворюватися кратери на поверхні шва, ближче до границі з основним металом. Цей процес може мати вибуховий характер і потребує додаткового вивчення.

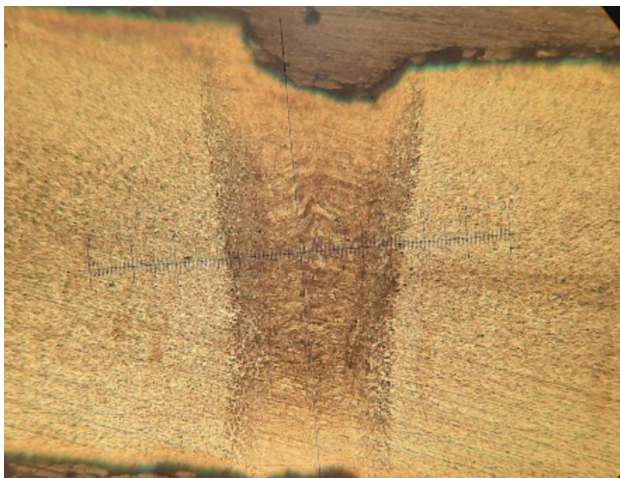


Рис. 4. Загальний вигляд мікроструктури зварного шва ($\times 100$) після травлення 4 % розчином HNO_3 в етанолі

Загальний вигляд мікроструктури зварного шва на профілі з товщиною металу 1,2 мм наведено на рис. 4.

З рис. 4 видно, що зона сплавлення має чітку дендритну структуру, характерну для рідкого металу, що кристалізується. Ширина зони становить 2–3 мм, причому вона розширюється за наближення до зовнішньої поверхні профіля (труби). Це може бути пов'язано з особливостями розподілу енергії лазерного променя під час зварювання.

Границя з твердим металом досить різка. На рис. 5 та 6, де мікроструктуру зварного шва представлено зі збільшеннями $\times 200$ та $\times 400$ відповідно, видно, що зона термічного впливу має протяжність 1–1,5 мм. Вона зберігає дрібнозернисту структуру, дисперсність якої перебуває на рівні вихідного металу. Це пояснюється високою питомою енергією лазерного променя, коли швидкість процесу плавлення металу більше, ніж швидкість теплопередачі у глибину основного металу. Тому зона термічного впливу відносно вузька, її температура швидко падає за рахунок теплопередачі у відносно холодний основний метал і значного зростання зерна в зоні термічного впливу не спостерігається.

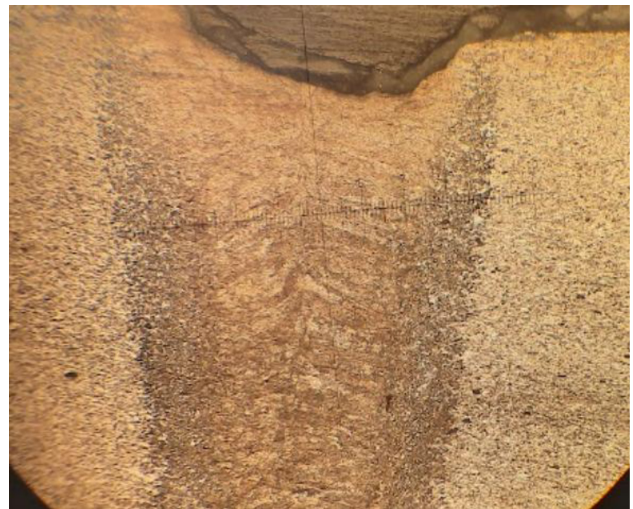


Рис. 5. Загальний вигляд мікроструктури зварного шва ($\times 200$) після травлення 4 % розчином HNO_3 в етанолі

Крім того, подрібнення зерна пов'язано з протіканням прямого $\alpha \rightarrow \delta$ та зворотного $\delta \rightarrow \alpha$ перетворення в термічному циклі «нагрів – охолодження».

На рис. 6 показано детальну будову зони сплавлення під час зварювання. Видно, що зона зустрічі фронтів кристалізації щільна, слідів усадочної пористості не виявляється. Це підтверджується даними рис. 1 та 2, де на

нетравлений поверхні також не виявлено ні пористості, ні неметалевих включень.



Рис. 6. Загальний вигляд мікроструктури зварного шва ($\times 400$) після травлення 4 % розчином HNO_3 в етанолі

Дендрити орієнтовані у напрямку відведення тепла, деякий поворот їх від чітко перпендикулярного напрямку відносно лінії стику пов'язаний з деякою нерівномірністю розподілу енергії по висоті шва. Верхня частина зони сплавлення має більшу ширину, дендрити мають більший розмір. Відсутність значного викривлення дендритів та ввігнута форма верхньої поверхні шву свідчать про те, що кристалізація металу відбулася вже після закінчення процесу стиснення кромок.

Таким чином, з точки зору мікроструктури висока корозійна стійкість металу шва та ЗТВ пояснюється тим, що у низьковуглецевому металі з мінімальним вмістом елементів, схильних до ліквідації (Si, S, P), хімічна неоднорідність матеріалу не виникає, а висока швидкість плавлення та кристалізації не приводить до формування значної структурної неоднорідності. Власне зона сплавлення не містить неметалевих включень та мікропористості, а рівень внутрішніх напружень не зростає, оскільки

кристалізація завершується після пластичної деформації під час стиснення кромок та існують умови для релаксації напружень.

Висновки. Встановлено, що мікроструктура зварного шва профілів з товщиною 1,2 мм характеризується чіткою дендритною структурою з шириною зони сплавлення 2–3 мм, яка розширюється ближче до поверхні труби через особливості розподілу енергії лазерного променя. Зона термічного впливу (1–1,5 мм) у профілях товщиною 1,2 мм зберігає дрібнозернисту структуру без значного зростання зерна, що пояснюється високою швидкістю теплових процесів під час лазерного зварювання та ефектом швидкого охолодження основного металу. Показано, що неметалеві включення в основному металі профілів товщиною 2 мм, зокрема оксиди, можуть сприяти нестабільності процесу зварювання, що проявляється підвищенням розбризкуванням та утворенням краперів на поверхні шва. Хімічна та структурна однорідність металу шва профілів товщиною 1,2 мм запобігає утворенню мікрогальванічних пар, а рівень внутрішніх напружень мінімальний завдяки завершенню кристалізації після пластичної деформації кромок. Для нерозкисленого металу характерна наявність підвищеного вмісту оксидних неметалевих включень. У поєднанні з відсутністю захисту шву від окислення будь-яким методом, що є особливістю лазерного зварювання, це приводить до окислення розплавленого металу (виникнення «іскріння» під час зварювання).

Низький вміст кремнію (Si) та марганцю (Mn) може спричиняти проблеми під час лазерного зварювання через підвищену кількість неметалевих включень та окислення.

Тому рекомендується для відповідальних замовлень та для виробництва продукції підвищеної якості використовувати метал з вмістом $\text{Si} \geq 0,1 \%$ та $\text{Mn} \geq 0,3 \%$ за мінімально можливого вмісту сірки та фосфору. Проте слід враховувати, що збільшення вмісту кремнію та марганцю може підвищити міцність матеріалу та утруднити процес формування профілю методом холодної деформації. Варто врахувати, що підвищений вміст Si сприяє утворенню силікатних неметалевих включень, що може погіршити пластичність металу, зокрема в зоні зварного шва. Для визначення оптимального діапазону концентрацій цих елементів потрібне проведення додаткових експериментів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Shelyagin V. D., Krivtsun I. V., Borisov Yu. S. та ін. Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies. *Paton Welding Journal of Avtomaticheskaya Svarka*. 2005. № 8. P. 44–49.
2. Khoddam S., Tian L., Sapanathan T. та ін. Latest developments in modeling and characterization of joining metal-based hybrid materials. *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 20. № 9. P. 1800048. <https://doi.org/10.1002/adem.201800048>
3. Бернацький А. В., Шелягін В. Д., Сидорець В. М., Берднікова О. М., Сіора О. В., Набок Т. М. Визначення технологічних особливостей лазерного зварювання стикових з'єднань з різномірних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні. *Вісник Черкаського Державного технологічного університету. Технічні науки*. 2019. № 4. С. 112–126. DOI: 10.24025/2306-4412.4.2019.184462
4. You P., Mi H., Feng L., Liao S., Liu Q., He B., Li J., Guo W. A comparative investigation on the microstructure and mechanical properties of laser and arc fillet welding of dissimilar steels with flux-cored wire. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 38. P. 2325–2340. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.075>
5. Cao J., Wang Y., Xu G., Liu X., Zeng X., Wei K. Effect of post-weld induction heat treatment on single-pass high-power laser-arc hybrid welded thick stainless-steel clad plate: microstructure, mechanical properties and corrosion resistance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 38. P. 2623–2635. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.068>
6. Weiss T., Hoffmann P., Harst F., Zaeh M. F. Towards high-speed laser beam welding of stainless-steel foils using an adjustable ring mode laser beam source. *Optics & Laser Technology*. 2025. Vol. 192. Part B. P. 113496. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113496>
7. Cheng B., Zhang H., Huang X., Hu K., Zhang M., Niu F. Microstructure evolution and property improvement of nickel-based alloy/duplex stainless steel welded joints with oscillating laser offset. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 38. P. 3746–3757. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.030>
8. Jing C., Annan W., Xiangchen M., Dongjie L., Guangfeng Y. Effect of welding speed on the microstructure and corrosion resistance of laser deep penetration welded joints of nuclear-grade 316H stainless steel. *Nuclear Materials and Energy*. 2025. Vol. 44. P. 101974. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2025.101974>
9. Mi H., Ma J., Liao S., You P., Feng L., Liu Q., Guo W., He B. Optimization process parameters in laser welding of CLF-1/316LN-IG dissimilar steels for improved welded joint formation and mechanical performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 38. P. 3131–3144. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.169>
10. Geng R., Ma N., Nishimoto D., Zhang R., Lu F., Li Z. Microstructure, element distribution and interfacial properties of laser welded iron–nickel–steel dissimilar joints. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 37. P. 2463–2473. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.152>

REFERENCES:

1. Shelyagin, V. D., Krivtsun, I. V., Borisov, Y. S., et al. (2005). Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies. *Paton Welding Journal of Avtomaticheskaya Svarka*, (8), 44–49.
2. Khoddam, S., Tian, L., Sapanathan, T., et al. (2018). Latest developments in modeling and characterization of joining metal-based hybrid materials. *Advanced Engineering Materials*, 20 (9), 1800048. <https://doi.org/10.1002/adem.201800048>
3. Bernatskyi, A. V., Sheliakhin, V. D., Sydorets, V. M., Berdnikova, O. M., Siora, O. V., & Nabok, T. M. (2019). Vyznachennia tekhnolohichnykh osoblyvostei lazernoho zvaryuvannia stykovykh z'iednan z riznорidnykh nerezhiuchykh austrychnykh stalei u vertykalnomu prostorovomu polozhenni [Determination of technological peculiarities of laser welding of butt joints of dissimilar austenitic stainless steels in vertical spatial position]. *Visnyk Cherkaskoho Derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of Cherkasy State Technological University. Technical Sciences*, (4), 112–126. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2019.184462> [in Ukrainian].
4. You, P., Mi, H., Feng, L., Liao, S., Liu, Q., He, B., Li, J., & Guo, W. (2025). A comparative investigation on the microstructure and mechanical properties of laser and arc fillet welding of dissimilar steels with flux-cored wire. *Journal of Materials Research and Technology*, 38, 2325–2340. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.075>
5. Cao, J., Wang, Y., Xu, G., Liu, X., Zeng, X., & Wei, K. (2025). Effect of post-weld induction heat treatment on single-pass high-power laser-arc hybrid welded thick stainless-steel clad plate: Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance. *Journal of Materials Research and Technology*, 38, 2623–2635. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.068>

6. Weiss, T., Hoffmann, P., Harst, F., & Zaeh, M. F. (2025). Towards high-speed laser beam welding of stainless-steel foils using an adjustable ring mode laser beam source. *Optics & Laser Technology*, 192 (B), 113496. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113496>
7. Cheng, B., Zhang, H., Huang, X., Hu, K., Zhang, M., & Niu, F. (2025). Microstructure evolution and property improvement of nickel-based alloy/duplex stainless steel welded joints with oscillating laser offset. *Journal of Materials Research and Technology*, 38, 3746–3757. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.030>
8. Jing, C., Annan, W., Xiangchen, M., Dongjie, L., & Guangfeng, Y. (2025). Effect of welding speed on the microstructure and corrosion resistance of laser deep penetration welded joints of nuclear-grade 316H stainless steel. *Nuclear Materials and Energy*, 44, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2025.101974>
9. Mi, H., Ma, J., Liao, S., You, P., Feng, L., Liu, Q., Guo, W., & He, B. (2025). Optimization process parameters in laser welding of CLF-1/316LN-IG dissimilar steels for improved welded joint formation and mechanical performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 38, 3131–3144. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.169>
10. Geng, R., Ma, N., Nishimoto, D., Zhang, R., Lu, F., & Li, Z. (2025). Microstructure, element distribution and interfacial properties of laser welded iron–nickel–steel dissimilar joints. *Journal of Materials Research and Technology*, 37, 2463–2473. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.152>

Стаття надійшла: 17.08.2025

Стаття прийнята: 03.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

