

УДК 621.791.7
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.5](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.5)

STUDY OF THE INFLUENCE OF HYBRID LASER-ARC WELDING PARAMETERS ON THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH STEELS

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ГІБРИДНОГО ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

Valeriy D. Poznyakov
paton39@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8581-3526

Artemii V. Bernatskyi
bernatskyi@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-8050-5580

Anatoliy V. Zavdoveev
avzavdoveev@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2811-0765

Oleksandr V. Siora
siora_ov@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1927-790X

Andrej V. Klapatyuk
Klapatyuk@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-8170-5322

Anatoliy M. Denisenko
Denisenko@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0001-7002-0400

Yurii Yu. Yurchenko
yuriyyurchenko14@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9253-009X

Mykola V. Sokolovskyi
m_sokolovskyi@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0003-3243-5060

В. Д. Позняков,
докт. техн. наук
А. В. Бернацький,
канд. техн. наук
А. В. Завдовсьєв,
канд. техн. наук
О. В. Сіора,
науковий співробітник
А. В. Клапатюк,
провідний інженер-технолог
А. М. Денисенко,
провідний інженер-технолог
Ю. Ю. Юрченко,
аспірант, провідний інженер
М. В. Соколовський,
доктор філософії

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. Purpose. The aim of this work is to study the influence of the main parameters of hybrid laser-arc welding on the geometric characteristics of welded joints of high-strength steels.

Method. The article presents the results of an experimental study of the hybrid laser-arc welding process of high-strength Armox 500T steel with a thickness of 10 mm using austenitic wire Khorda 307Ti (08X20H9Г7Т) with a diameter of 1.2 mm, using various parameters of both the laser and arc components of the process, as well as the welding speed.

Results. A general trend of increasing weld area with increasing linear energy of hybrid laser-arc welding has been observed, but the nature of this dependence is uneven. In the range of 430–600 J/mm, local decreases in the weld area were recorded. With an increase in linear energy (620–1350 J/mm), a direct dependence of the weld area on its value is observed, despite an increase in the penetration depth. Reaching a linear energy of 1500 J/mm, sufficient for complete penetration in one pass, leads to the formation of a through weld and, accordingly, a decrease in the welded joint area. A general trend of increase in penetration depth with increasing linear energy has been established, but a decrease has been observed in the range of 600–750 J/mm. It has been shown that the penetration depth is determined by the ratio of the linear energy of the laser component to the total linear energy of the hybrid process, and, with constant characteristics of the laser source, by the welding speed. In samples with a higher proportion of laser energy, a stable increase in penetration depth was observed.

Scientific novelty. The scientific novelty of the work lies in clarifying the patterns of weld geometry formation in hybrid laser-arc welding of high-strength steels, taking into account the interaction of the laser and arc components of the process. The understanding of the influence of linear energy on the nature of heat exchange processes and the formation of the fusion zone has been expanded, which creates scientific prerequisites for a reasonable choice of hybrid welding modes.

Practical significance. The practical significance of the results obtained lies in the fact that the experimental data obtained can be used in the development and adjustment of technological modes of hybrid laser-arc welding of elements of light armored vehicles made of high-strength steels. The established features of the formation of the geometry of the welded joint and the depth of penetration depending on the process parameters allow for a reasonable selection of welding modes to ensure stable quality of welded joints, increase productivity, and reduce the likelihood of defects in industrial conditions.

Key words: hybrid laser-arc welding; welding parameters; high-strength steels; weld geometry; weld area; penetration depth.

Анотація. Мета. Метою роботи є дослідження впливу основних параметрів гібридного лазерно-дугового зварювання на геометричні характеристики зварних з'єднань високоміцних сталей.

Методика. У статті наведено результати експериментального дослідження процесу гібридного лазерно-дугового зварювання високоміцної сталі Armoх 500Т товщиною 10 мм за допомогою аустенітного дроту Хорда 307Ті (08Х20Н9Г7Т) діаметром 1,2 мм з використанням різних параметрів як лазерної так і дугової складових процесу, а також швидкості зварювання.

Результати. Виявлено загальну тенденцію зростання площі зварного з'єднання при збільшенні погонної енергії гібридного лазерно-дугового зварювання, однак характер цієї залежності є нерівномірним. У діапазоні 430–600 Дж/мм зафіксовано локальні зниження площі шва. При збільшенні погонної енергії (620–1350 Дж/мм) спостерігається пряма залежність площі зварного шва від її величини попри зростання глибини проплавлення. Досягнення погонної енергії 1500 Дж/мм, достатньої для повного провару за один прохід, призводить до формування наскрізного шва та, відповідно, зменшення площі зварного з'єднання. Для глибини проплавлення встановлено загальну тенденцію до зростання зі збільшенням погонної енергії, однак у діапазоні 600–750 Дж/мм зафіксовано її зниження. Показано, що глибина проплавлення визначається співвідношенням погонної енергії лазерної складової до загальної погонної енергії гібридного процесу, а за сталих характеристик лазерного джерела – швидкістю зварювання. У зразках з вищою часткою лазерної енергії відмічено стабільне підвищення глибини проплавлення.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в уточненні закономірностей формування геометрії зварного шва при гібридному лазерно-дуговому зварюванні високоміцних сталей з урахуванням взаємодії лазерної та дугової складових процесу. Розширено уявлення про вплив погонної енергії на характер теплообмінних процесів і формування зони сплавлення, що створює наукові передумови для обґрунтованого вибору режимів гібридного зварювання.

Практична значимість. Практична значимість, отриманих результатів полягає у тому, що отримані експериментальні дані можуть бути використані при розробці та коригуванні технологічних режимів гібридного лазерно-дугового зварювання елементів легкоброньованої техніки з високоміцних сталей. Встановлені особливості формування геометрії зварного з'єднання та глибини проплавлення залежно від параметрів процесу дозволяють обґрунтовано обирати режими зварювання для забезпечення стабільної якості зварних з'єднань, підвищення продуктивності та зниження ймовірності дефектів у промислових умовах.

Ключові слова: гібридне лазерно-дугове зварювання; параметри зварювання; високоміцні сталі; геометрія зварного з'єднання; площа шва; глибина проплавлення.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Останнім часом в Україні для реалізації проектів нового покоління ЛБТ застосовуються сучасні термічно зміцнені броньові сталі високої міцності з границею текучості понад 1200 МПа та твердістю 500НВ. Це широко відомі вітчизняна сталь марки 71 та сталі закордонного виробництва марок ARMSTAL 500, Miilux Protection 500, RAMOR 500, ARMOX 500 Т та ін., з високими показниками статичної і динамічної міцності, а також високими експлуатаційними характеристиками [1]. Але технологічні властивості,

з різних причин, є незадовільними для успішного застосування високопродуктивних процесів пов'язаних з повторними нагріваннями, зокрема зварювання, наплавлення тощо. Головною проблемою найбільш поширеного у виробництві дугового зварювання броньових сталей є зміна властивостей металу в зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань [2]. Найбільш суттєві зміни відбуваються як на ділянці перегріву, так і на ділянці відпуску ЗТВ. Структурно-фазові перетворення на ділянці перегріву характеризуються збільшенням розміру аустенітного зерна

та розвитком високотемпературної хімічної мікронеоднорідності, а при подальшому охолодженні утворенням пластинчастого мартенситу. Наслідком чого є підвищена загроза виникнення холодних тріщин під дією залишкових зварювальних напружень. В свою чергу структурно-фазові перетворення на ділянці відпуску ЗТВ не мають суттєвих змін у морфології та розмірах зерен, але призводять до знеміцнення, яке обумовлене цілим рядом факторів, як то анігіляція дислокацій, ріст або розчинення карбідів тощо [3, 4].

Також однією з актуальних проблем є забезпечення мінімальної пористості у зварному з'єднанні є однією з актуальних проблемами процесу гібридного зварювання, оскільки роботи, пов'язані з вивченням цієї проблематики [5, 6], вказують на можливість формування пор розміром до 0,4 мм в діаметрі. Для мінімізації цих дефектів важливо визначити вплив зміни складових процесу та режимів обробки на пористість зварного з'єднання.

Перелічені особливості формування структури та властивостей зварних з'єднань вимагають виконувати дугове зварювання на понижених режимах, що призводить до зниження продуктивності виготовлення виробів ЛБТ. Сьогодні це мотивує до пошуку нових високошвидкісних технологій зварювання, які забезпечать високу продуктивність та якість виробів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Впровадження процесу гібридного лазерно-дугового зварювання (HLAW) розглядається як ефективний спосіб підвищення швидкості зварювання та продуктивності виготовлення зварних елементів легкоброньованої техніки у 1,5–2 рази. Водночас при розробці технології гібридного лазерно-дугового зварювання броневих сталей залишається актуальним питання достатності енергетичного потенціалу процесу для надійного зварювання виробів товщиною 8–10 мм.

Гібридне лазерно-дугове зварювання є ефективнішою технологією, ніж традиційні процеси зварювання. Завдяки поєднанню сильних сторін різних джерел тепла, цей підхід ефективно усуває обмеження, властиві кожному окремому джерелу тепла при окремому використанні [4, 7, 8]. Крім того, HLAW пропонує кілька переваг, включаючи зменшену кількість зварювальних проходів для досягнення еквівалентної глибини проплавлення, меншу величину тепловкладення, меншу зону термічного впливу та зменшення пористості та дефектів у вигляді тріщин. Поєднуючи лазерні та дугові джерела тепла, їхні додаткові переваги дозволяють ефективно контролювати підведення тепла та запобігати локальному перегріву. Крім того, цей підхід зменшує ризик локалізованої концентрації напружень у зварному шві, спричиненої надмірно швидким охолодженням. Отже, HLAW може значно зменшити утворення надмірних залишкових

напружень та деформацій у заготовці під час процесу зварювання [9, 10, 11].

У роботі [6] показано, що отримання бездефектних зварних з'єднань надвисокоміцних сталей (AHSS) можливе лише за умови оптимізації режимів зварювання для кожного матеріалу. Невдалий вибір параметрів сприяє утворенню пор та карбідних скупчень, а підготовка крайок істотно впливає на перебіг процесу, об'єм розплавленого металу, мікроструктуру та твердість зварного шва. Встановлено, що мікротвердість у зоні термічного впливу становить 390...550 HV, що перевищує показники дугового зварювання та є співставним з лазерним, при цьому відсутність розтріскування дозволяє виконувати зварювання без попереднього підігріву.

У роботі [12] підтверджено можливість гібридного лазерно-дугового зварювання броневих сталей товщиною 9,8 мм без утворення дефектів. Показано, що зона термічного впливу зі зниженими значеннями твердості є майже вдвічі меншою порівняно з лазерним зварюванням. Мікроструктура металу шва була переважно мартенситною з домішками фериту та бейніту, просторовий розподіл яких зумовлений особливостями форми зварного шва та течії розплаву, характерними для процесу HLAW.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

В даній роботі приділена увага науковому обґрунтуванню застосування прогресивної технології високопродуктивного процесу гібридного лазерно-дугового зварювання. Ця технологія передбачає взаємодію двох джерел тепла а саме між електричною дугою та лазерним променем у спільній ванні розплавленого металу. Лазер створює так звану замкову щілину в з'єднанні, що сприяє глибокому зварюванню, тоді як дуга служить вторинним джерелом тепла, забезпечуючи присадний метал для покращення здатності перекриття зазорів та розширення діапазону підведення тепла [13, 14]. Така взаємодія створює синергетичний ефект, який використовує переваги обох процесів, тим самим покращуючи загальну якість зварного шва.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження впливу основних параметрів гібридного лазерно-дугового зварювання на геометричні характеристики зварних з'єднань високоміцних сталей.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Роботи з відпрацювання оптимальних режимів гібридного лазерно-дугового зварювання високоміцних сталей виконано на лабораторному стенді, який був змонтований на базі трьох-координатного маніпулятора, виготовленого у ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Для експериментів використовувався Nd:YAG-лазер «DY044» виробництва фірми «ROFIN-SINAR» (Німеччина) з довжиною хвилі випромінювання

$\lambda = 1,06$ мкм та максимальною потужністю лазерного випромінювання $P = 4,4$ кВт.

В якості джерела зварювальної дуги було використано перетворювач для дугового зварювання ПСГ-500-1УЗ. Перетворювач ПСГ-500-1УЗ призначений для живлення установок напівавтоматичного і автоматичного зварювання в середовищі вуглекислого газу плавким електродом з постійною швидкістю подачі електродного дроту на струмах від 60 до 500 А. Межі регулювання напруги 16-40 В. Потужність генератора становить 20 кВт з коефіцієнтом потужності 0,9.

Об'єктом дослідження була вибрана сталь марки ARMOX 500T (% мас.): С ~ 0,28%; Si ~ 0,24%; Mn ~ 0,85%; Cr ~ 0,49%; Ni ~ 0,78%; Mo ~ 0,35%; S ~ 0,001%; P ~ 0,015%; B ~ 0,0015%. Ця марка сталі є представником класу високоміцних броньових сталей високої твердості з межею плинності більше 1200 МПа та твердістю 540НВ. Вона широко застосовується в країнах Європи та Україні для виготовлення металоконструкцій ЛБТ.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для дослідження впливу параметрів гібридного лазерно-дугового зварювання на геометрію з'єднань було проведено наплавлення дроту Хорда 307Ti (08X20H9Г7Т) діаметром 1,2 мм на сталь Армох 500Т товщиною 10 мм (Зразок 1572 та Зразок 1573). Перед наплавленням поверхню металу зачищали від окалини. В якості захисного газу використано зварювальну суміш Ar 82% + CO₂ 18% з витратою $Q = 20$ л/хв. Температура навколишнього середовища становила 23 °С.

Хімічний склад дроту 307Ti (08X20H9Г7Т) (% мас.): С ~ 0,1%; Si ~ 0,5-1%; Mn ~ 5-8%; Cr ~ 18,5-22%; Ni ~ 8-10%; Mo ~ 0,25%; S ~ 0,0018%; P ~ 0,035%, Ti 0,6-0,9%.

Режими гібридного лазерно-дугового наплавлення на сталь Армох 500Т наведено в табл. 1.

Вигляд макрошліфів зразка 1572 з наплавленим гібридним лазерно-дуговим методом дротом Хорда 307Ti наведено на рис. 1.

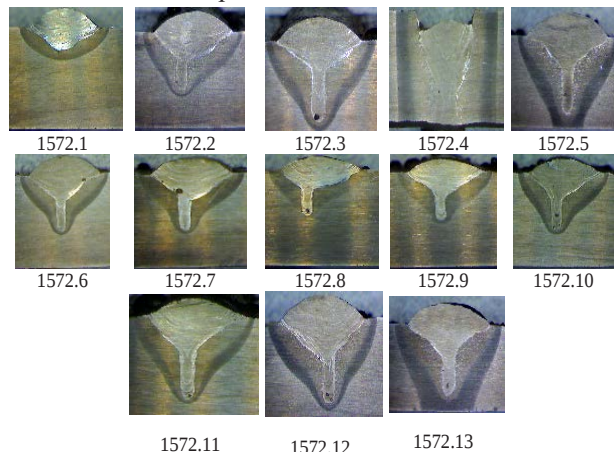


Рис. 1. Макрошліфи зразка 1572 зі сталі Армох 500 з наплавленими гібридним лазерно-дуговим методом дротом Хорда 307Ti.

Режими гібридного лазерно-дугового наплавлення зразка 1573 на сталь Армох 500 наведено в табл. 2.

Таблиця 1. Режими гібридного лазерно-дугового наплавлення зразка 1572 дротом Хорда 307Ti на сталь Армох 500Т

№	P, кВт	U _{хол} , В	U _{роб} , В	I, А	V _{зв} , м/год	V _{пр} , м/хв
1572.1	4,0	23	29-30	195-200	60	8,1
1572.2	4,0	23	29-30	195-200	48	8,1
1572.3	4,0	23	29-30	195-200	36	8,1
1572.4	4,0	23	29-30	195-200	24	8,1
1572.5	4,0	23	29-30	195-200	30	8,1
1572.6	4,0	23	29-30	195-200	72	8,1
1572.7	4,0	23	29-30	195-200	84	8,1
1572.8	4,0	22	26-27	175-180	84	6,9
1572.9	4,0	22	26-27	175-180	72	6,9
1572.10	4,0	22	26-27	175-180	60	6,9
1572.11	4,0	22	26-27	175-180	48	6,9
1572.12	4,0	22	26-27	175-180	36	6,9
1572.13	4,0	22	26-27	175-180	24	6,9

Таблиця 2. Режими гібридного лазерно-дугового наплавлення дротом Хорда 307Ti на сталь Армох 500.

№	P, кВт	U _{хол} , В	U _{роб} , В	I, А	V _{зв} , м/год	V _{пр} , м/хв
1573.1	4,0	22	25-26	140-150	84	6
1573.2	4,0	23	26	150-160	72	6,4
1573.3	4,0	23	26-27	160-165	60	6,7
1573.4	4,0	23	27-27,5	160-170	48	6,7
1573.5	4,0	23	27-27,5	160-170	36	6,7

Вигляд макрошліфів зразка 1573 з наплавленим гібридним лазерно-дуговим методом дротом Хорда 307Ті наведено на рис. 2.

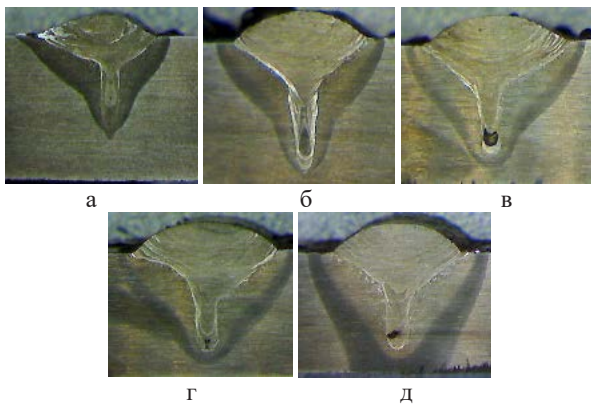


Рис. 2. Макрошліфи зразка 1573 зі сталі Armoх 500 з наплавленими гібридним лазерно-дуговим методом дротом Хорда 307Ті: а) 1573.1, б) 1573.2, в) 1573.3, г) 1573.4, д) 1573.5

Для визначення впливу режимів гібридного лазерно-дугового зварювання на формування зварних з'єднань броньової сталі високої твердості було виміряно геометричні параметри (площа та глибина проплавлення) проварів зразків 1572 та 1573, а також визначено погонну енергію процесу зварювання.

На рис. 3, а наведено залежність площі шва від погонної енергії зварювання зразків 1572.1, 1572.10, 1573.3. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 60 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 240 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка

1572.1 – 200 А; 1572.10 – 180 А; 1573.3 – 160 А та напруги: для зразка 1572.1 – 30 В; 1572.10 – 26 В; 1573.3 – 26 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.1 – 600 Дж/мм; 1572.10 – 520,8 Дж/мм; 1573.3 – 510 Дж/мм. З графіку на рис. 3, а видно, що на проміжку погонної енергії у 510-600 Дж/мм спостерігається падіння величини площі шва. Це пояснюється процесами, що відбуваються під час гібридного лазерно-дугового зварювання, а саме тим, що за даних значень погонної енергії можливість створення зварного з'єднання углиб (у вигляді “keyhole”) лазерною частиною гібридного процесу знижується до свого мінімуму.

На рис. 3, б наведено залежність площі шва від погонної енергії зварювання зразків 1572.2, 1572.11, 1573.4. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 48 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 300 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.2 – 200 А; 1572.11 – 180 А; 1573.4 – 160 А та напруги: для зразка 1572.2 – 30 В; 1572.11 – 26 В; 1573.4 – 27 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.2 – 750 Дж/мм; 1572.11 – 651 Дж/мм; 1573.4 – 640 Дж/мм. На проміжку погонної енергії у 640-750 Дж/мм спостерігається невелике падіння величини площі шва з його подальшим зростанням до величин, перевищуючих початкові (Рис. 3, б). Зменшення величини площі шва пояснюється процесами, що відбуваються під час гібридного лазерно-дугового зварювання, а саме тим, що за значень погонної енергії у 600-650 Дж/мм відбувається реконфігурація гібридного з'єднання, котра також спостерігалась на рис. 3, а.

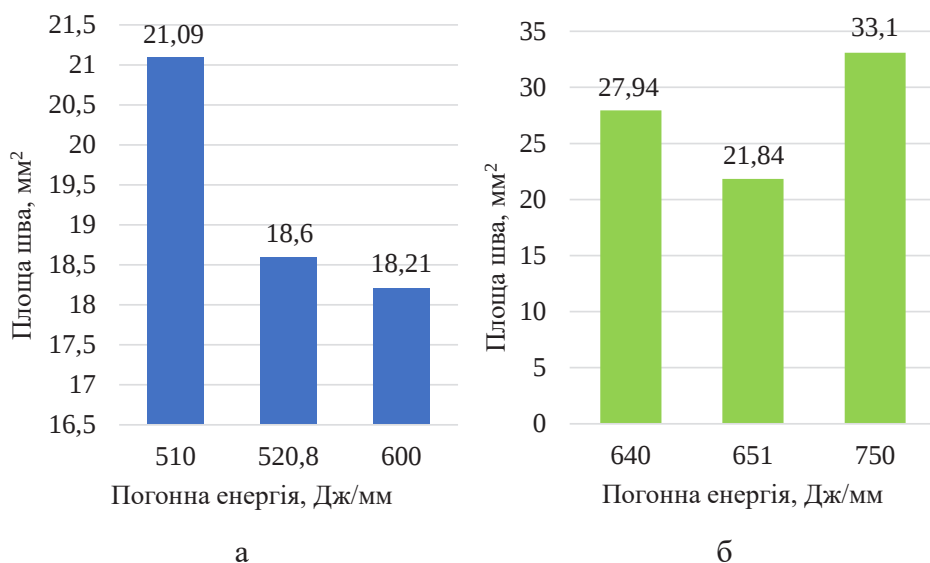


Рис. 3. Графік залежності площі шва від погонної енергії зразків: а) 1572.1; 1572.10; 1573.3; б) 1572.2, 1572.11, 1573.4

На рис. 4, а наведено залежність площі шва від погонної енергії зварювання зразків 1572.3, 1572.12, 1573.5. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 36 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 400 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.3 – 200 А; 1572.12 – 180 А; 1573.5 – 160 А та напруги: для зразка 1572.3 – 30 В; 1572.12 – 26 В; 1573.5 – 27 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.3 – 1000 Дж/мм; 1572.12 – 868 Дж/мм; 1573.5 – 832 Дж/мм. З графіка на рис. 2.51 у проміжку погонної енергії 800-1000 Дж/мм спостерігається зростання величини площі шва. Цей ріст відбувається нерівномірно, з більшим зростанням ширини «валика» зварного з'єднання відносно глибини проплавлення. Це свідчить про більш активний розподіл теплової енергії в зоні дугового зварювання, що залишає меншу кількість енергії на поглиблення зварного з'єднання за рахунок енергії лазерного випромінювання.

На рис. 4, б наведено залежність площі шва від погонної енергії зварювання зразків 1572.6, 1572.9, 1573.2. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 72 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 200 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.6 – 200 А; 1572.9 – 180 А; 1573.2 – 160 А та напруги: для зразка 1572.6 – 30 В; 1572.9 – 26 В; 1573.2 – 27 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.6 – 500 Дж/мм; 1572.9 – 434 Дж/мм; 1573.2 – 408 Дж/мм. На проміжку погонної енергії

у 400-500 Дж/мм спостерігається невелике падіння величини площі шва з його подальшим зростанням до величин, перевищуючих початкові (Рис. 4, б). Зниження величини шва в даному випадку пояснюється інтенсифікацією теплообмінних процесів у «валику» зварного з'єднання та зменшення кількості енергії, відповідальної за зварювання «вглиб».

На рис. 5, а наведено залежність площі шва від погонної енергії зварювання зразків 1572.7, 1572.8, 1573.1. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 84 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 180 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.7 – 200 А; 1572.8 – 180 А; 1573.1 – 160 А та напруги: для зразка 1572.7 – 30 В; 1572.8 – 26 В; 1573.1 – 27 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.7 – 428,57 Дж/мм; 1572.8 – 372 Дж/мм; 1573.1 – 332,17 Дж/мм. На графіку на рис. 5, а у проміжку погонної енергії 300-430 Дж/мм спостерігається лінійне зростання величини площі шва. Цей ріст відбувається достатньо рівномірно, однак, на даному проміжку відбувається нерівномірний розподіл зміни ширини «валика» зварного з'єднання відносно глибини проплавлення. Це свідчить про зміни у розподілі теплової енергії в зварному з'єднанні.

На рис. 5, б наведено залежність площі шва від погонної енергії зварювання зразків 1572.4, 1572.13. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 24 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 600 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.4 – 200 А; 1572.13 –

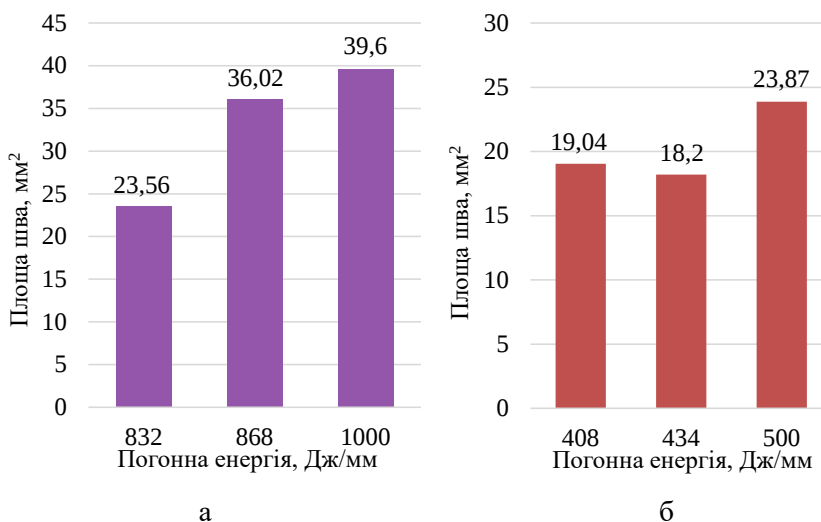


Рис. 4. Графік залежності площі шва від погонної енергії зразків: а) 1572.3, 1572.12, 1573.5; б) 1572.7, 1572.8, 1573.1

180 А та напруги: для зразка 1572.4 – 30 В; 1572.13 – 26 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.4 – 1500 Дж/мм; 1572.13 – 1302 Дж/мм. На проміжку погонної енергії 1300-1500 Дж/мм, зображеному на графіку на рис. 5, б спостерігається падіння величини площі шва. Це відбувається через те, що на даних величинах погонної енергії відбувається наскрізне проплавлення, що призводить до створення наскрізного шва без «валика», котрий складає значну частину площі зварного шва.

На рис. 6, а наведено залежність глибини проплавлення від погонної енергії зварювання зразків 1572.1, 1572.10, 1573.3. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 60 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 240 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.1 – 200 А; 1572.10 – 180 А; 1573.3 – 160 А та напруги: для зразка 1572.1 – 30 В; 1572.10 – 26 В; 1573.3 – 26 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.1 – 600 Дж/мм; 1572.10 – 520,8 Дж/мм; 1573.3 – 510 Дж/мм.

На рис. 6, а видно, що після невеликого росту глибини проплавлення, на проміжку погонної енергії у 530-600 Дж/мм спостерігається її падіння. Це пояснюється специфікою процесів, що відбуваються під час гібридного лазерно-дугового зварювання, а саме – тим, що у цьому проміжку значень погонної енергії за рахунок збільшення ширини поверхневої частини шва («валика») знижується можливість створення зварного з'єднання углуб (у вигляді «keyhole»).

На рис. 6, б наведено залежність глибини проплавлення від погонної енергії зварювання зразків 1572.2, 1572.11, 1573.4. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 48 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала

300 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.2 – 200 А; 1572.11 – 180 А; 1573.4 – 160 А та напруги: для зразка 1572.2 – 30 В; 1572.11 – 26 В; 1573.4 – 27 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.2 – 750 Дж/мм; 1572.11 – 651 Дж/мм; 1573.4 – 640 Дж/мм.

На проміжку погонної енергії у 640-750 Дж/мм спостерігається зростанням глибини проплавлення з його подальшим падінням (Рис. 6, б). Зменшення глибини проплавлення пояснюється специфікою процесів теплообміну, що відбуваються під час гібридного дугового-лазерного зварювання, а саме тим, що за значень погонної енергії у 600-750 Дж/мм відбувається зміна конфігурації гібридного з'єднання, котра також спостерігається на рис. 5, б.

На рис. 7, а наведено залежність глибини проплавлення від погонної енергії зварювання зразків 1572.3, 1572.12, 1573.5. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 36 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 400 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.3 – 200 А; 1572.12 – 180 А; 1573.5 – 160 А та напруги: для зразка 1572.3 – 30 В; 1572.12 – 26 В; 1573.5 – 27 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.3 – 1000 Дж/мм; 1572.12 – 868 Дж/мм; 1573.5 – 832 Дж/мм.

На рис. 7, а у проміжку погонної енергії 800-1000 Дж/мм спостерігається зростання глибини проплавлення шва. Темп росту даної величини сповільнюється зі зростанням погонної енергії, що можна пояснити тим, що при більш високих значеннях теплової енергії більше енергії витрачається на розширення шва, аніж на його заглиблення.

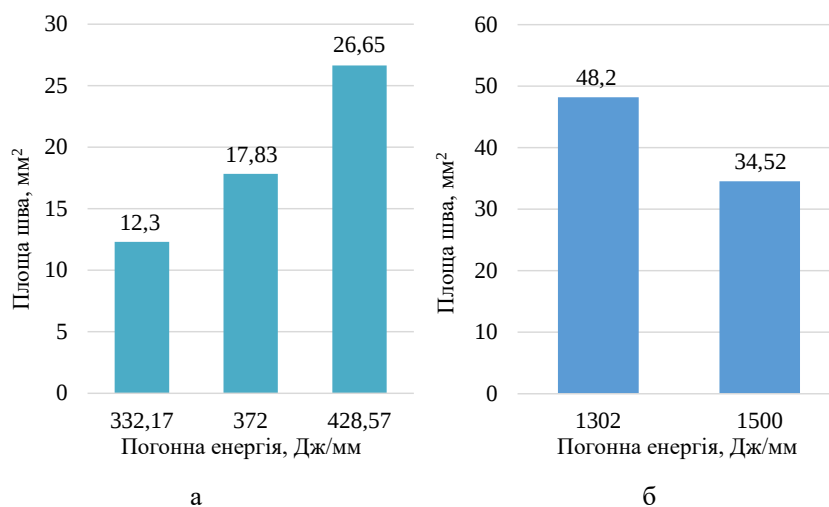


Рис. 5. Графік залежності площі шва від погонної енергії зразків: а) 1572.7, 1572.8, 1573.1, б) 1572.4, 1572.13

На рис. 7, б наведено залежність глибини проплавлення від погонної енергії зварювання зразків 1572.6, 1572.9, 1573.2. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 72 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 200 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.6 – 200 А; 1572.9 – 180 А; 1573.2 – 160 А та напруги: для зразка 1572.6 – 30 В; 1572.9 – 26 В; 1573.2 – 27 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.6 – 500 Дж/мм; 1572.9 – 434 Дж/мм; 1573.2 – 408 Дж/мм.

На рис. 7, б на проміжку погонної енергії у 400–500 Дж/мм спостерігається невелике падіння величини глибини проплавлення з його подальшим поверненням до початкових значень. Зниження величини шва в даному випадку пояснюється інтенсифікацією теплообмінних процесів у «валику» зварного з'єднання та зменшення кількості енергії, відповідальної за зварювання «вглиб».

На рис. 8, а наведено залежність глибини проплавлення від погонної енергії зварювання зразків 1572.7, 1572.8, 1573.1. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 84 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 180 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.7 – 200 А; 1572.8 – 180 А; 1573.1 – 160 А та напруги: для зразка 1572.7 – 30 В; 1572.8 – 26 В; 1573.1 – 27 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.7 – 428,57 Дж/мм; 1572.8 – 372 Дж/мм; 1573.1 – 332,17 Дж/мм.

На графіку у проміжку погонної енергії 300–430 Дж/мм спостерігається невелике падіння величини глибини проплавлення з його подальшим зростанням (Рис. 8, а). Цей ріст відбувається нерівномірно через зміни у розподілі теплової енергії в зварному з'єднанні, що призводить до збільшення

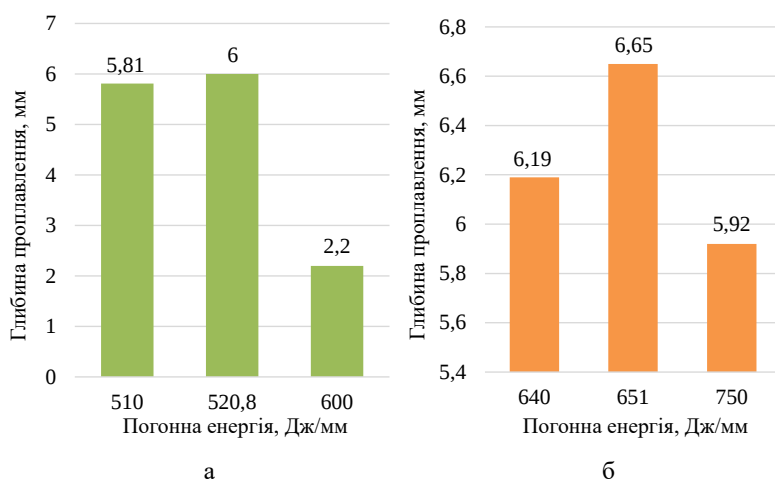


Рис. 6. Графік залежності глибини проплавлення від погонної енергії зразків: а) 1572.1, 1572.10, 1573.3; б) 1572.2, 1572.11, 1573.4

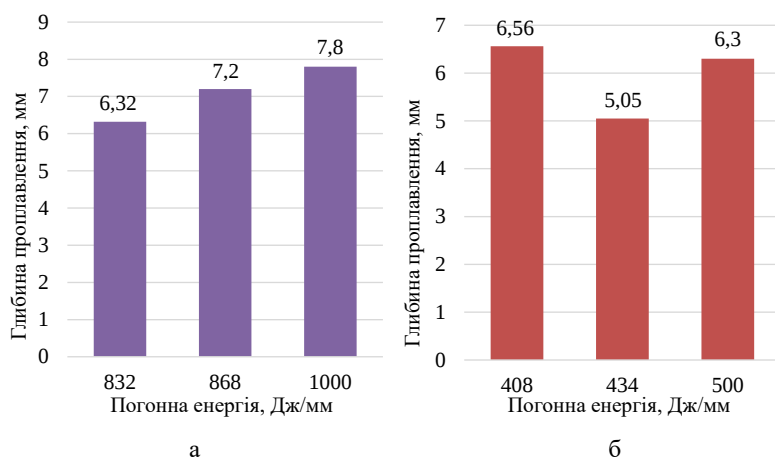


Рис. 7. Графік залежності глибини проплавлення від погонної енергії зразків: а) 1572.3, 1572.12, 1573.5; б) 1572.6, 1572.9, 1573.

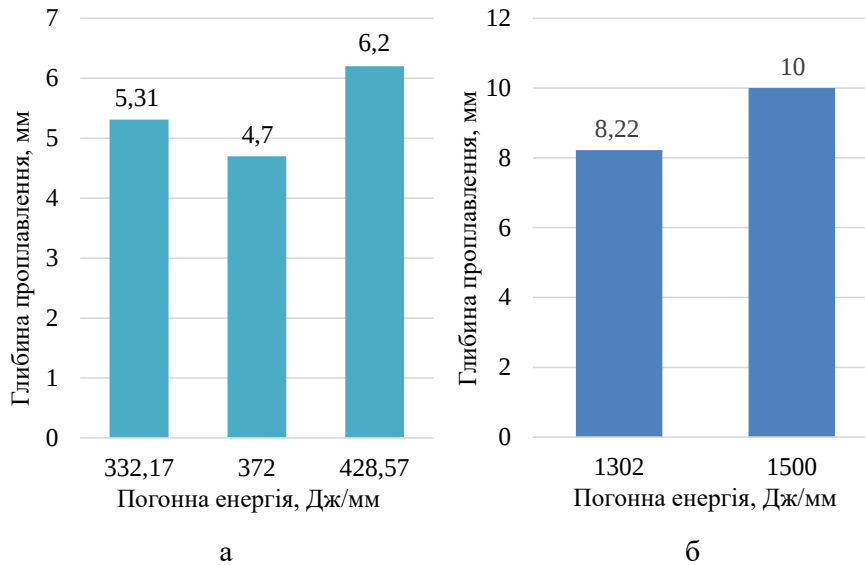


Рис. 8. Графік залежності глибини проплавлення від погонної енергії зразків:
а) 1572.7, 1572.8, 1573.1; б) 1572.4, 1572.13

ширини «валика» зварного з'єднання та зниження глибини проплавлення.

На рис. 8, б наведено залежність глибини проплавлення від погонної енергії зварювання зразків 1572.4, 1572.13. Вказані зразки були зварені зі швидкістю 24 м/год, при постійній величині лазерної складової погонної енергії зварювання, яка складала 600 Дж/мм. Зміна величини дугової частини погонної енергії зварювання забезпечувалась шляхом зміни значення струму, яке становило, відповідно, для зразка 1572.4 – 200 А; 1572.13 – 180 А та напруги: для зразка 1572.4 – 30 В; 1572.13 – 26 В. Погонна енергія процесу зварювання для зразків була наступною: для зразку 1572.4 – 1500 Дж/мм; 1572.13 – 1302 Дж/мм.

З графіку на рис. 8, б на проміжку погонної енергії 1300-1500 Дж/мм спостерігається зростання величини глибини проплавлення до її максимальної величини. Це свідчить про повне проплавлення деталі при значенні погонної енергії у 1500 Дж/см.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТТІ

Отримані в роботі результати свідчать, що геометричні характеристики зварного шва при гібридному лазерно-дуговому зварюванні високоміцних сталей суттєво залежать від величини погонної енергії та співвідношення енергетичних внесків лазерної й дугової складових процесу. Встановлена загальна тенденція зростання площі зварного шва та глибини проплавлення зі збільшенням погонної енергії узгоджується з даними у роботах [6, 15], де вказано, що HLAW забезпечує ефективніше використання тепловкладення порівняно з окремими лазерним або дуговим процесами.

Аналіз глибини проплавлення показав, що її зростання загалом корелює зі збільшенням погонної енергії, однак за значень 600–750 Дж/мм спостерігається її зниження.

Подібні немонотонні залежності наведені в роботах [4, 15], де вони пов'язуються зі зміною конфігурації теплообміну та переходом між різними режимами взаємодії лазера і дуги. При цьому підтверджено, що визначальним фактором для досягнення більшої глибини проплавлення є відношення погонної енергії лазерної складової до загальної погонної енергії гібридного процесу, що також відзначено для AHSS і HSLA сталей у [6, 16].

Результати проведених досліджень свідчать, що гібридне лазерно-дугове зварювання забезпечує гнучке керування геометричними характеристиками зварного з'єднання за рахунок регулювання погонної енергії та балансу між лазерною і дуговою складовими. Водночас виявлені локальні відхилення від монотонних залежностей свідчать про необхідність подальшого детального аналізу теплофізичних процесів і потоків розплаву при гібридному лазерно-дуговому зварюванні.

ВИСНОВКИ

У результаті досліджень впливу параметрів гібридного лазерно-дугового зварювання на характеристики геометричних параметрів проварів було встановлено наступне:

1. Виявлено загальну тенденцію зростання площі зварного з'єднання при збільшенні погонної енергії гібридного лазерно-дугового зварювання, однак характер цієї залежності є нерівномірним. У діапазоні 430–600 Дж/мм зафіксовано локальні зниження площі шва, що пов'язано з реконфігурацією гібридного процесу та інтенсифікацією теплообміну у верхній частині зварного з'єднання за рахунок зменшення частки енергії, відповідальної за проплавлення вглиб.

2. При збільшенні погонної енергії (620–1350 Дж/мм) спостерігається пряма залежність площі зварного шва від її величини, що зумовлено

концентрацією більшої частини енергії у верхній частині шва («шпаці») попри зростання глибини проплавлення. Досягнення погонної енергії 1500 Дж/мм, достатньої для повного провару за один прохід, призводить до формування наскрізного шва та, відповідно, зменшення площі зварного з'єднання.

3. Для глибини проплавлення встановлено загальну тенденцію до зростання зі збільшенням погонної енергії, однак у діапазоні 600–750 Дж/мм зафіксовано

її зниження, що обумовлено змінами конфігурації теплообміну в гібридному лазерно-дуговому процесі.

4. Показано, що глибина проплавлення визначається співвідношенням погонної енергії лазерної складової до загальної погонної енергії гібридного процесу, а за сталих характеристик лазерного джерела – швидкістю зварювання. У зразках з вищою часткою лазерної енергії відмічено стабільне підвищення глибини проплавлення.

REFERENCES

- [1] Chupryna, V., Fedenko, V., Akymov, O. i Sorochkin, O. (2024). Analiz mitsnosnykh kharakterystyk suchasnykh ta perspektyvnykh konstruktivnykh materialiv dlia kolisnoi bronovanoi tekhniki. *Naukovi Pratsi Derzhavnoho Naukovo-doslidnoho Instytutu Vyprobuvann I Sertyfikatsii Ozbroyennia Ta Viiskovoi Tekhniki*, 20(3), 146–151. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.18>
- [2] Ishide, T., Tsubota, S., & Watanabe, M. (2003). Latest MIG, TIG arc-YAG laser hybrid welding systems for various welding products. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 4831, 347. <https://doi.org/10.1117/12.497771>
- [3] Wang, J., Sun, Q., Zhang, T., Zhang, S., Liu, Y., & Feng, J. (2017). Arc characteristics in alternating magnetic field assisted narrow gap pulsed GTAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 254, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.042>
- [4] Silva, R. G. N., De Paço, C. M. M., Rodrigues, M. B., De Sousa, J. M. S., Pereira, M., Ramos, B. B., Schwedersky, M. B., & Silva, R. H. G. E. (2020). A comparison between LBW and hybrid laser-GMAW processes based on microstructure and weld geometry for hardenable steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(9–10), 2801–2814. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06076-1>
- [5] Subashini, L., Prabhakar, K. V. P., Gundakaram, R. C., Ghosh, S., & Padmanabham, G. (2016). Single pass Laser-ARC hybrid welding of maraging steel thick sections. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(16), 2186–2198. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1221099>
- [6] Atabaki, M. M., Ma, J., Liu, W., & Kovacevic, R. (2014). Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel. *Materials & Design (1980-2015)*, 67, 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.072>
- [7] He, Y., Song, X., Yang, Z., Duan, R., Xu, J., Wang, W., Chen, L., Shi, M., & Chen, S. (2025). Research and Development Progress of Laser-Arc Hybrid Welding: A review. *Metals*, 15(3), 326. <https://doi.org/10.3390/met15030326>
- [8] Acherjee, B. (2017). Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, 99, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
- [9] Wang, J., Qi, T., Zhong, C., Zhang, H., Li, X., & Liu, F. (2021). Study on seam nitrogen behavior of high nitrogen steel hybrid welding. *Optik*, 242, 167026. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167026>
- [10] Zhen, S., Duan, Z., Sun, D., Li, Y., Gao, D., & Li, H. (2013). Study on microstructures and mechanical properties of laser-arc hybrid welded S355J2W+N steel. *Optics & Laser Technology*, 59, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.11.021>
- [11] Li, L., Xia, H., Ma, N., Pan, B., Huang, Y., & Chang, S. (2018). Comparison of the welding deformation of mismatch and normal butt joints produced by laser-arc hybrid welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 678–687. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.07.015>
- [12] Sowards, J. W., Hussey, D. S., Jacobson, D. L., Ream, S., & Williams, P. (2018). Correlation of Neutron-Based Strain Imaging and Mechanical Behavior of Armor Steel Welds Produced with the Hybrid Laser Arc Welding Process. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 123, 1–8. <https://doi.org/10.6028/jres.123.011>
- [13] Kim, Y., & Kil, S. (2013). Recent technological tendency of Laser/ARC hybrid welding. *Journal of Welding and Joining*, 31(2), 4–15. <https://doi.org/10.5781/kwjs.2013.31.2.4>
- [14] Zhang, Y. M., Yang, Y., Zhang, W., & Na, S. (2020). Advanced Welding Manufacturing: A brief analysis and review of challenges and solutions. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11). <https://doi.org/10.1115/1.4047947>
- [15] Liu, W., Ma, J., Yang, G., & Kovacevic, R. (2014). Hybrid laser-arc welding of advanced high-strength steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2823–2833. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.018>
- [16] Cao, X., Wanjara, P., Huang, J., Munro, C., & Nolting, A. (2011). Hybrid fiber laser – Arc welding of thick section high strength low alloy steel. *Materials & Design (1980-2015)*, 32(6), 3399–3413. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.002>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Чуприна, В., Феденько, В., Акимов, О. і Сорочкін, О. (2024). Аналіз міцносних характеристик сучасних та перспективних конструкційних матеріалів для колісної броньованої техніки. *Наукові Праці Державного Науково-дослідного Інституту Випробувань І Сертифікації Озброєння Та Військової Техніки*, 20(3), 146–151. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.18>
- [2] Ishide, T., Tsubota, S., & Watanabe, M. (2003). Latest MIG, TIG arc-YAG laser hybrid welding systems for various welding products. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 4831, 347. <https://doi.org/10.1117/12.497771>

- [3] Wang, J., Sun, Q., Zhang, T., Zhang, S., Liu, Y., & Feng, J. (2017). Arc characteristics in alternating magnetic field assisted narrow gap pulsed GTAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 254, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.042>
- [4] Silva, R. G. N., De Paço, C. M. M., Rodrigues, M. B., De Sousa, J. M. S., Pereira, M., Ramos, B. B., Schwedersky, M. B., & Silva, R. H. G. E. (2020). A comparison between LBW and hybrid laser-GMAW processes based on microstructure and weld geometry for hardenable steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(9–10), 2801–2814. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06076-1>
- [5] Subashini, L., Prabhakar, K. V. P., Gundakaram, R. C., Ghosh, S., & Padmanabham, G. (2016). Single pass Laser-ARC hybrid welding of maraging steel thick sections. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(16), 2186–2198. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1221099>
- [6] Atabaki, M. M., Ma, J., Liu, W., & Kovacevic, R. (2014). Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel. *Materials & Design (1980-2015)*, 67, 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.072>
- [7] He, Y., Song, X., Yang, Z., Duan, R., Xu, J., Wang, W., Chen, L., Shi, M., & Chen, S. (2025). Research and Development Progress of Laser–Arc Hybrid Welding: A review. *Metals*, 15(3), 326. <https://doi.org/10.3390/met15030326>
- [8] Acherjee, B. (2017). Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, 99, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
- [9] Wang, J., Qi, T., Zhong, C., Zhang, H., Li, X., & Liu, F. (2021). Study on seam nitrogen behavior of high nitrogen steel hybrid welding. *Optik*, 242, 167026. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167026>
- [10] Zhen, S., Duan, Z., Sun, D., Li, Y., Gao, D., & Li, H. (2013). Study on microstructures and mechanical properties of laser–arc hybrid welded S355J2W+N steel. *Optics & Laser Technology*, 59, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.11.021>
- [11] Li, L., Xia, H., Ma, N., Pan, B., Huang, Y., & Chang, S. (2018). Comparison of the welding deformation of mismatch and normal butt joints produced by laser-arc hybrid welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 678–687. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.07.015>
- [12] Sowards, J. W., Hussey, D. S., Jacobson, D. L., Ream, S., & Williams, P. (2018). Correlation of Neutron-Based Strain Imaging and Mechanical Behavior of Armor Steel Welds Produced with the Hybrid Laser Arc Welding Process. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 123, 1–8. <https://doi.org/10.6028/jres.123.011>
- [13] Kim, Y., & Kil, S. (2013). Recent technological tendency of Laser/ARC hybrid welding. *Journal of Welding and Joining*, 31(2), 4–15. <https://doi.org/10.5781/kwjs.2013.31.2.4>
- [14] Zhang, Y. M., Yang, Y., Zhang, W., & Na, S. (2020). Advanced Welding Manufacturing: A brief analysis and review of challenges and solutions. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11). <https://doi.org/10.1115/1.4047947>
- [15] Liu, W., Ma, J., Yang, G., & Kovacevic, R. (2014). Hybrid laser-arc welding of advanced high-strength steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2823–2833. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.018>
- [16] Cao, X., Wanjara, P., Huang, J., Munro, C., & Nolting, A. (2011). Hybrid fiber laser – Arc welding of thick section high strength low alloy steel. *Materials & Design (1980-2015)*, 32(6), 3399–3413. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.002>

© Позняков В. Д., Бернацький А. В., Завдовсєв А. В., Сіора О. В.,
 Клапатюк А. В., Денисенко А. М., Юрченко Ю. Ю., Соколовський М. В.
 Дата першого надходження статті до видання: 12.02.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)