

УДК 621.791.92
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).3](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).3)

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR LASER WELDING OF WELD ROOTS IN THICK-WALLED BUTT JOINTS MADE OUT OF 25Kh2NMFA HEAT-RESISTANT STEEL

ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ КОРЕНЕВОГО ШВА ТОВСТОСТІННИХ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ 25Х2НМФА

Artemii V. Bernatskyi

bernatskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0002-8050-5580

Oleksandr V. Siora

siora_ov@ukr.net

ORCID: 0000-0003-1927-790X

Mykola V. Sokolovskyi

m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0003-3243-5060

Yurii V. Yurchenko

yuriyyurchenko14@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9253-009X

Valentyna I. Bondarieva

laser-77@online.ua

ORCID: 0000-0002-4745-0995

А. В. Бернацький

канд. техн. наук, старший дослідник, завідувач відділу

О. В. Сіора

науковий співробітник

М. В. Соколовський

аспірант, провідний інженер

Ю. В. Юрченко

аспірант, інженер-технолог I категорії

В. І. Бондарєва

заступник завідувача відділу

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. Welding of thick-walled steam turbine rotor discs made of heat-resistant alloy steels is associated with significant difficulties in obtaining the required properties and the phase and structural state of their welded joints. Another important challenge for this process lies in ensuring high properties of thick-walled welded joints is to ensure the quality of the weld root layers. Due to its deep location, the probability of defects such as pore cracks, non-points, burns, and sagging of the back roller, is the highest in this part of the weld, reducing the performance and reliability of the welded joint and the rotor as a whole. Submerged arc welding requires the use of a special lining ring in the root part of the workpiece to ensure high-quality weld root formation. The disadvantage of this welding method is the significant heat input, which leads to the overheating of the metal in the near-seam zone of the weld root and deterioration of the metal properties. In addition, a significant stress concentration is formed in the area, where the weld is fused to the lining ring, which also contributes to crack formation. Obtaining a high-quality weld root by arc welding without a lining ring with complete and stable penetration of large-diameter ring welds presents itself a complex engineering and scientific task. The aim of this work is to achieve optimal geometry, satisfactory formation and the necessary strengthening of the weld root in butt joints of heat-resistant steel 25Kh2NMFA via development of the laser welding technique for this process. The summary of the research results shows that by selecting the laser welding parameters and filler wire feed rate, it is possible to achieve optimal geometry, satisfactory formation and the required strengthening of the weld root. According to the results of the research, it was found that the U-shaped edge preparation proved to be the most acceptable. The U-shaped edge preparation, compared to the V-shaped one, requires less weld metal and, due to the wider gap in the weld root, facilitates the process when applying the first weld root. The optimal (from the point of view of forming the geometry of the welded joint, as well as for the absence of defects) mode of weld root seams of 25Kh2NMFA steel joints with U-shaped edge development is as follows: radiation power – 4 kW; welding speed – 16 m/h; focal distance – 200 mm; focus depth – 2 mm; gas consumption: CO₂ – 20 l/min; wire feed speed for a wire of 1.2 mm diameter – 38.4 m/h.

Key words: steam turbines; welded rotor; laser welding; shielding gas; edge preparation; weld root.

Анотація. Зварювання товстостінних дисків роторів парових турбін з складнолегованих теплостійких сталей, пов'язане із значними труднощами отримання необхідних властивостей та фазового і структурного стану їх зварних з'єднань. Ще однією з важливих проблем забезпечення високих властивостей товстостінних зварних з'єднань є забезпечення якості кореневих шарів шва. Через глибоке розташування в цій частині зварного шва є найбільша ймовірність утворення дефектів, таких як пори тріщини, непровари, прожоги, провисання зворотного валика, які знижують працездатність та надійність зварного з'єднання та ротора в цілому. Дугове зварювання під флюсом потребує застосування спеціального підкладного кільця кореневій частині розробки для забезпечення якісного формування кореневого шва. Недоліком такого методу зварювання є значне тепловкладення, яке спричиняє перегрівання металу в біляшовній зоні кореневої частини шва та погіршенню властивостей металу. Крім того, на ділянці сплавлення шва з підкладним кільцем, утворюється значна концентрація напружень, що сприяє утворенню тріщини. Отримання якісного кореневого шва дуговим зварюванням без підкладного кільця з повним та стабільним проваром кільцевих швів великого діаметру роторів є складною інженерною та науковою задачею. Метою даної роботи є досягнення оптимальної геометрії, задовільного формування та необхідного посилення кореневого шва у стикових з'єднаннях теплостійкої сталі 25X2НМФА, шляхом відпрацювання технології лазерного зварювання. Узагальнення результатів досліджень свідчить про те, що за рахунок вибору параметрів лазерного зварювання та швидкості подачі присадного дроту можна досягти оптимальної геометрії, задовільного формування та необхідного посилення кореневого шва. За результатами досліджень встановлено, що більш прийнятною формою виявилася U-подібна розробка кромки. U-подібна підготовка кромки у порівнянні з V-подібною, вимагає меншої кількості наплавленого металу, а також завдяки ширшому зазору в корені шва полегшує ведення процесу при накладенні першого кореневого шва. Оптимальний (з позицій формування геометрії зварного з'єднання та відсутності дефектів) режим зварювання кореневих швів з'єднань сталі 25X2НМФА з U-подібним розробкою кромки наступний: потужність випромінювання – 4 кВт; швидкість зварювання – 16 м/год; фокусна відстань – 200 мм; заглиблення фокусу – 2 мм; витрати газу: CO_2 – 20 л/хв; швидкість подачі дроту діаметром 1,2 мм – 38,4 м/год.

Ключові слова: парові турбіни; зварний ротор; лазерне зварювання; захисний газ; розробка крайок; кореневий шов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Парові турбіни є одним з найбільш складних елементів сучасної енергетичної установки [1], параметри експлуатації якої характеризуються високими параметрами пари, значними частотами обертання роторів, статичними і динамічними навантаженнями [2], корозійною дією робочого середовища і рядом інших факторів [3]. Це обумовлює підвищену їх пошкоджуваність, яка становить 15...25% від пошкоджуваності іншого енергетичного обладнання [4].

Для нових ТЕС і АЕС розроблені парові турбіни нового покоління потужністю до 2000 МВт [5], в яких реалізовані сучасні конструктивні і технічні рішення, що забезпечують високі показники надійності, економічності і ремонтпридатності. Важливим елементом їх є ротор, швидкість обертання якого знижено з 3000 до 1500 об/хв. Такі ротори мають великі габарити і масу. Для виготовлення його потрібна поковка масою приблизно 460 т, діаметром більшим 2000 мм [6]. Ковальсько-пресове обладнання, яке потрібно для цього, є унікальним і досить дорогим. Для роторів парових турбін, які експлуатують при температурах понад 500°C, застосовують Cr-Mo, Cr-Mo-V сталі [7]. При виготовленні великих поковок з складнолегованих сталей важко забезпечити рівномірне гартування металу та отримати однакові властивості по перетину. Відомі випадки руйнування суцільно кованих роторів і роторів з насадними дисками, які приводили до великих аварій на електростанціях. Одними з причин їх були металургійні дефекти металу, які не

було усунуто куванням через значні розміри перетину злитка.

У зв'язку з труднощами виготовлення кованих роторів, була розроблена його конструкція в зварному варіанті [6]. Маса ротора такої конструкції в кілька разів менше в порівнянні з масою кованих роторів. Зварні ротори, що складаються з окремих кованих дисків і хвостовиків, з'єднаних між собою циліндричними перемичками зі зварними швами, знайшли широке застосування в циліндрах низького тиску (ЦНТ) парових турбін НВО «Турбоатом» [6].

Зварювання товстостінних дисків роторів парових турбін з складнолегованих теплостійких сталей, пов'язане із значними труднощами отримання необхідних властивостей та фазового і структурного стану їх зварних з'єднань. Ще однією з важливих проблем забезпечення високих властивостей товстостінних зварних з'єднань є забезпечення якості кореневих шарів шва. Через глибоке розташування в цій частині зварного шва є найбільша ймовірність утворення дефектів, таких як пори тріщини, непровари, прожоги, провисання зворотного валика [7], які знижують працездатність та надійність зварного з'єднання та ротора в цілому [8].

Дугове зварювання під флюсом потребує застосування спеціального підкладного кільця кореневій частині розробки для забезпечення якісного формування кореневого шва [6]. Недоліком такого методу зварювання є значне тепловкладення, яке спричиняє перегрівання металу в біляшовній зоні кореневої

частини шва та погіршенню властивостей металу. Крім того, на ділянці сплавлення шва з підкладним кільцем, утворюється значна концентрація напружень, що сприяє утворенню тріщини.

Для підвищення надійності та роботоспроможності в сучасній технології виготовлення роторів застосовують аргонодугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом без підкладного кільця [6]. Такий метод зварювання має стабільний процес при значно меншій погонній енергії, ніж автоматичне дугове зварювання під флюсом, що дозволяє зменшити перегрівання металу в біляшовній зоні та забезпечує якісне формування кореневого шару шва. Недоліком аргонодугового зварювання є невелика стійкість вольфрамового електроду. В процесі тривалого неперервного зварювання сплаплюється робоча частина вольфрамового електроду та змінюється її геометрія. Це сприяє зниженню концентрації дугового нагрівання та глибини проплавлення, що призводить до нестабільного формування шва та утворення в ньому дефектів. Схема корневих швів ротора парової турбіни, які виконано дуговим зварюванням під флюсом на підкладному кільці (а) та аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом зображено на рис. 1.

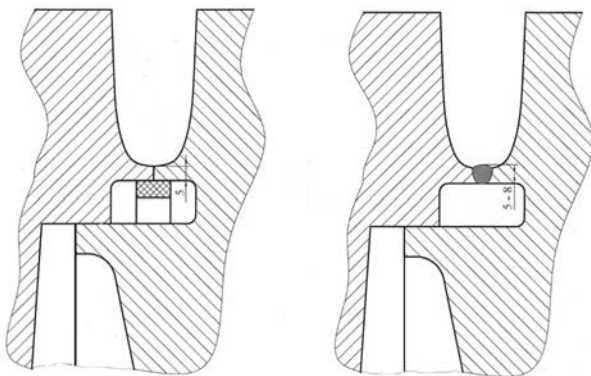


Рис. 1. Схема корневих швів ротора парової турбіни, які виконано дуговим зварюванням під флюсом на підкладному кільці (а) та аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом [7]

Таким чином, отримання якісного кореневого шва без підкладного кільця з повним та стабільним проваром кільцевих швів великого діаметру роторів є складною інженерною та науковою задачею. Актуальність рішення її обумовлена необхідністю підвищення роботоспроможності та надійності енергетичного обладнання, у зв'язку з переведенням його на підвищені параметри експлуатації.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Для усунення зазначених недоліків дугових способів перспективними є методи лазерного зварювання. Основну перевагу зварюванню лазерним випромінюванням надає висока щільність потужності

випромінювання, що взаємодіє з оброблюваним матеріалом. Застосування лазерного випромінювання дозволяє, отримувати більш сприятливі структури, як в металі шва [9], так і в зоні термічного впливу ЗТВ [10], забезпечити високий рівень механічних властивостей [11–13] і щільності швів, тощо [14–16].

Існують на даний час певні проблеми й стосовно технологій з лазерного зварювання зазначених металевих конструкцій. Серед них, нестабільність процесу і якості лазерного зварювання у глибоку розробку товстостінних деталей [12], негативний вплив плазмового факела на втрати потужності [15], розбризкування металу. Це може сприяти утворенню дефектів шва – пор, несплавлень, несприятливої форми шва і структури металу та ін. Для їх усунення недоліків лазерного зварювання вже наразі розроблено різні способи управління лазерним випромінюванням і його впливу на зону зварювання. Зокрема, пропонуються застосування захисного газу (CO_2 , аргону, гелію, азоту, їх сумішей), вакууму, гранульованих і аерозольних флюсів та ін.

Підсумовуючи вищенаведений матеріал треба зазначити, що забезпечення надійності та експлуатаційної працездатності відповідальних компонентів турбоагрегатів, наприклад, роторів потужних парових турбін є серйозною проблемою. При цьому одним із найбільш актуальних завдань є якісне виконання корневих швів з'єднань ротора.

Враховуючи особливості конструкцій, їх зварювання виконується у складних умовах за яких важко здійснити контроль якості зварних з'єднань. У той же час від зварювання корневих швів залежить геометрія виробу, його ресурс та надійність загалом. В даний час кореневі шви роторів циліндра низького тиску (ЦНД) виконують аргонодуговим зварюванням неплавким електродом навісу або на сталевий підкладці, що залишається (для ЦНД тихохідних турбін). Однак при такому способі зварювання складно забезпечити стабільний 100% провар кореня шва по всьому периметру з'єднання, особливо при виготовленні великогабаритних роторів турбін великої потужності. Істотним недоліком зварювання корневих швів на підкладному кільці є утворення конструктивно-технологічного непровару, який, будучи потенційним концентратором напружень, сприяє зниженню рівня міцності втоми і підвищенню схильності до крихкого руйнування. Тому пошук нового способу зварювання кореневого шва з гарантованим проваром і забезпеченням зворотного формування є першочерговим технологічним завданням, яке має вирішуватися при розробці технології зварювання таких виробів.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є досягнення оптимальної геометрії, задовільного формування та необхідного посилення кореневого шва у стикових з'єднаннях теплостійкої сталі 25Х2НМФА, шляхом відпрацювання технології лазерного зварювання.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сталь 25X2НМФА застосовується для виготовлення заготовок дисків та хвостовиків роторів потужних парових турбін. Кількість молібдену 0,4–0,6% забезпечує поряд з підвищеною прожарюваністю малу схильність до відпускнуї крихкості. Наявність ванадію в малих кількостях забезпечує формування дрібнодендритної структури злитків та перешкоджає зростанню зерна при нагріваннях сталі в процесах термічної обробки. Сумарний вміст сірки та фосфору має бути не більше 0,035%. Хімічний склад сталі 25X2НМФА наведено у таблиці 1.

Для зварювання теплостійких сталей необхідні присаджувальні матеріали, які забезпечують більш високий рівень властивостей зварених з'єднань і наплавленого металу. Для зварювання сталі 25X2НМФА застосовували стандартний зварювальний кремніймарганцевий дріт марки Св-08ХН2ГМЮ. Вимоги до його хімічного складу наведені у таблиці 2.

Механічні властивості заготовок сталі 25X2НМФА після остаточної термообробки, визначені на тангенціальних зразках, повинні відповідати вимогам, наведеним у таблиці 3.

Здавальними характеристиками для заготовок сталі 25X2НМФА виконаних дуговим зварюванням є межа плинності, відносне подовження, відносне звуження, ударна в'язкість та випробування на вигин. Коливання твердості для різних точок не повинно перевищувати 35 одиниць НВ. Макроструктура повинна мати тріщин, флокенів, пухкості, усадкових раковин, великих неметалевих включень і скупчень дрібних неметалевих включень. Точкові включення розміром до 1,0 мм не враховуються. Наявність

дефектів у зоні зварювання не допускається. Розташування включень ланцюжком не допускається. Вміст залишкового водню в металі має не перевищувати $2,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

За критичну температуру крихкості $T_{\text{кр}}$ приймається температура, що забезпечує 50% волокнистої складової у зламі та за величиною ударної в'язкості KCV, що дорівнює 59 Дж/см^2 . Для сталі 25X2НМФА $T_{\text{кр}}$ має становити $+10^\circ\text{C}$. Найбільш небезпечним дефектом зварних з'єднань високоміцних сталей (у тому числі сталі 25X2НМФА) є холодні тріщини. Холодні тріщини утворюються при зварюванні сталей, що містять понад 0,15% і до 3% легуючих елементів, тобто, сталей перлітного та мартенситного класів. Холодні тріщини зароджуються та розвиваються на ділянках перегріву навколошовної зони, тобто в зоні крупнозернистого мартенситу, що утворюється в процесі охолодження аустеніту від максимальної температури.

Об'єктом роботи було дослідження та визначення оптимальних умов отримання якісних корневих швів зі зворотним формуванням при з'єднанні товстостінного металу з використанням лазерного випромінювання. Оскільки ця проблема, як було зазначено вище, є характерною для товстостінних зварних конструкцій, що використовуються в теплової енергетиці, то в якості предмету досліджень в даному випадку було вибрано з'єднання теплостійкої сталі 25X2НМФА товщиною 30 мм. При цьому вирішувалось ряд методичних і технологічних завдань, що відносяться до вибору типу лазера, вибору захисного газу та форми оброблення крайок, встановлення оптимальних параметрів та відпрацювання технології лазерного зварювання. Схематичне зображення використаних у роботі зварних з'єднань представлено на рис. 2.

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 25X2НМФА, згідно ТУ 108.1082-82

Масова частка елементів (максимальна), %								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P
0,24-0,28	<0,35	0,4-0,7	1,8-2,2	1,3-1,6	0,4-0,6	0,05	0,015	0,015

Таблиця 2. Хімічний склад дроту Св-08ХН2ГМЮ у вагових % за ГОСТ 2246-70

Масова частка елементів (максимальна), %								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	S	P
0,06-0,11	0,25-0,55	1,00-1,40	0,7-1,10	2,00-2,50	0,40-0,65	0,06-0,18	0,030	0,030

Таблиця 3. Механічні властивості сталі 25X2НМФА

Тип зразків	Межа міцності σ_b , МПа	Умовна межа плинності, $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне подовження, δ_5 , %	Відносне звуження, ψ , %	Ударна в'язкість, KCV, Дж/см ²	Кут загину, градус α°	Твердість по Брінелю, НВ
Тангенціальні	657	520	14	40	59	120	270

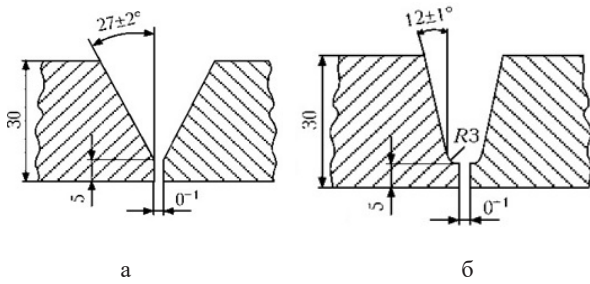


Рис. 2. Схема обробки кромки для лазерного зварювання V-подібна (а) та U-подібна (б)

Товщина притуплення, що дорівнює 5 мм, була обрана з міркувань технологічності при складанні та мінімального перерізу кореневого шва, що відповідає умовам міцності. Слід зауважити, що на етапі попередніх досліджень щодо відпрацювання окремих параметрів режиму зварювання з'єднань з зазначеним притупленням кромки було використано сталь 09Г2С товщиною 5 мм.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

В якості джерела випромінювання було вибрано твердотільний лазер типу DY 044. Дослідження щодо вибору параметрів режимів зварювання, які б дозволили забезпечити необхідну якість кореневої частини шва, проводили з використанням стикових з'єднань розміром 300×150×5 мм без оброблення

кромки при різних потужностях випромінювання від 2,5 до 4,0 кВт. Випромінювання фокусували лінзою з фокусною відстанню 300 мм. Зварювання вели за допомогою трикоординатного маніпулятора.

Як зазначалося вище, в переважній більшості випадків, при лазерному зварюванні застосовують захист ванни та остигаючого металу струменем газу. В якості захисного середовища використовували вуглекислий газ CO₂ і суміш MIX-1 (82% Ar + 18% CO₂).

Основним критерієм для встановлення оптимальних умов та параметрів лазерного зварювання були якість зварного з'єднання. Контроль якості здійснювали шляхом вивчення макроструктури поперечному перерізі темплетів, вирізаних з зварних з'єднань. Якість з'єднання вважалася задовільною за відсутності пір, тріщин, несплавлень, шлакових включень, а також за нормами увігнутості і опуклості кореня шва зі зворотного боку.

З таблиці 4 видно, що найкращий захист металу шва забезпечує вуглекислий газ. При зварюванні в суміші на вибраній швидкості зварювання (16 м/год) утворювалися пори.

Враховуючи це в подальших експериментах для основного захисту зварних з'єднань використовували вуглекислий газ. Його подачу здійснювали в голову

Таблиця 4. Вплив потужності випромінювання та захисного газу на макроструктуру та геометрію зварного з'єднання сталі 09Г2С товщиною 5 мм

Потужність лазерного випромінювання, кВт	Захисний газ	
	CO ₂	Суміш MIX-1 (82 % Ar + 18 % CO ₂)
4,0		
3,5		
3		
2,8		
2,5		

ванни. Для додаткового захисту металу шва, що кристалізується, в хвіст ванни подавали аргон.

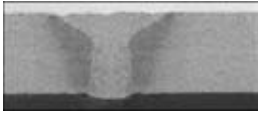
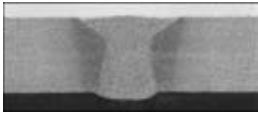
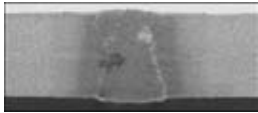
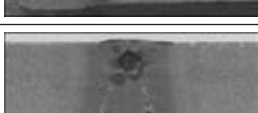
У таблиці 5 наведено дані щодо впливу розфокусування випромінювання на геометрію проплавлення при захисті вуглекислим газом та сумішшю ($\text{CO}_2 + \text{Ar}$). При цьому поверхню деталей, що зварюються, розташовували вище або нижче фокальної площини об'єктива, де сфокусований пучок має найменший діаметр. В результаті досліджень підтверджено, що діаметр сфокусованого променя безпосередньо впливає на щільність потужності і відповідно на геометрію проплавлення. Найкращі результати досягаються під час заглиблення фокусу під поверхню зразка на 2,0 мм.

Як відомо, особливості зварювання теплостійких сталей перлітного класу пов'язані з високою їх

чутливістю до зміни структури, а відповідно і механічних властивостей металу ЗТВ під впливом термічних циклів зварювання. Враховуючи високу схильність цих сталей до утворення крихких загартованих структур у металі ЗТВ, зазвичай їх дугове зварювання виконують з попереднім та супутнім підігрівом, а після зварювання з'єднання піддають високому відпуску. Крім того, при багатопохідному зварюванні металу товщиною понад 20 мм для зменшення ризику утворення холодних тріщин корінь шва рекомендується виконувати більш пластичним матеріалом, ніж при заповненні обробки (при TIG зварюванні використовується дріт Св-08Г2С).

У зв'язку з цим наступні дослідження зі зварювання корневих швів з'єднань роторної сталі 25Х2НМФА

Таблиця 5. Вплив розфокусування лазерного випромінювання та тиску захисного газу на макроструктуру та геометрію зварного з'єднання сталі 09Г2С товщиною 5 мм

Заглиблення фокусу лазерного випромінювання	Захисний газ	
	CO_2	Суміш MIX-1 (82 % Ar + 18 % CO_2)
+5		
+3		
+2		
+1		
0		
-1		
-2		
-3		
-5		

проводили з попереднім підігрівом до 250...300°C та з використанням присадочного дроту. Відпрацювання технології лазерного зварювання корневих швів стикових з'єднань із сталі 25Х2НМФА товщиною 30 мм проводили на жорстких пробах з подачею та без подачі присадочного дроту. Як присадковий матеріал використовували дріт Св-08Г2С Ø1,2 мм.

Зварювання виконувалося на наступних режимах: потужність випромінювання $P=4$ кВт, швидкість зварювання $V_{зв}=16$ м/год, швидкість подачі дроту $V_{пр}=100$ м/год, фокусна відстань $F=200$ мм, заглиблення фокусу $\Delta F=-2$ мм. Витрати захисного газу: у голову ванни CO_2 $Q=20$ л/хв, у хвіст ванни Ar $Q=14$ л/хв.

Як зазначалося вище, для зварювання корневих швів сталі 25Х2НМФА використовували дві конструкції розробки кромки жорстких стиків (див. рис. 3) з притупленням 5 мм. За критерій при виборі типу оброблення приймалося оброблення, яке дозволяє отримати зварне з'єднання з хорошим проваром кореня шва при мінімальній витраті наплавленого металу.

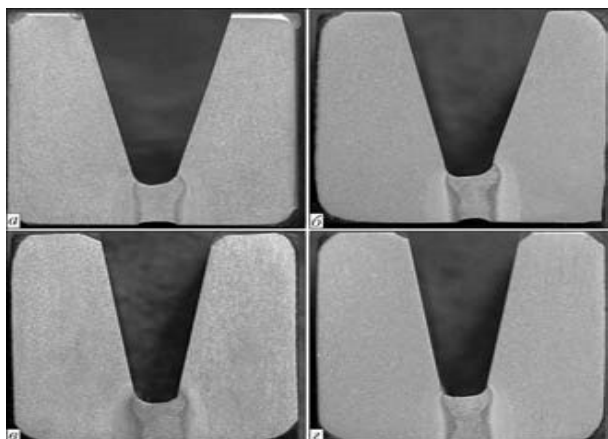


Рис. 3. Макрошліфи кореневого шва, виконаного лазерним зварюванням з V-(а, б) та U-подібною (в, г) обробкою та притупленням 5 мм

За результатами досліджень встановлено, що більш прийнятною формою виявилася U-подібна обробка (рис. 3.б). U-подібна підготовка кромки у порівнянні з V-подібною вимагає меншої кількості наплавленого металу, а також завдяки ширшому зазору в корені шва полегшує ведення процесу при накладенні першого кореневого шва.

При зварюванні з V-подібним обробленням без присадочного дроту шов має ослаблений переріз, втягнутий всередину зі зворотного боку обробки (рис. 3.а), і ймовірність руйнування такого шва досить висока. При зварюванні V-подібного оброблення із застосуванням присадочного дроту (рис. 4) виходить дещо більший переріз, але зворотне формування через присутність своєрідного концентратора (канавка замість кореневого валика) є неприйнятним.

Встановлено також, що на форму кореневої частини швів впливає й спосіб зварювання (без та з застосуванням присадочного дроту). На рис. 5 показані макрошліфи корневих швів стикового з'єднання, виконаного лазерним зварюванням без присадочного дроту та з присаджувальним дротом.

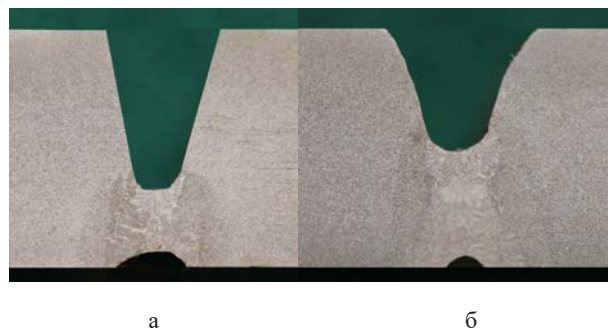


Рис. 4. Макрошліфи кореневого шва, виконаного лазерним зварюванням з V-подібною обробкою та притупленням 5 мм: а – без присаджувального матеріалу; б – з присаджувальним матеріалом

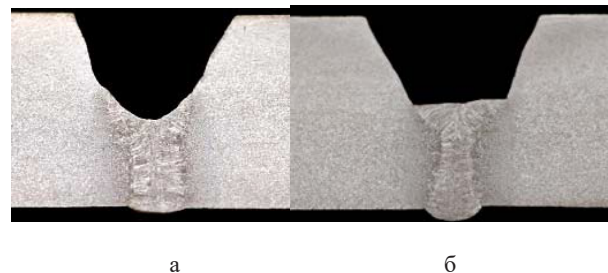


Рис. 5. Макрошліфи кореневого шва, виконаного лазерним зварюванням з U-подібною обробкою та притупленням 5 мм а – без присаджувального матеріалу; б – з присаджувальним матеріалом

Вони свідчать, що зварні з'єднання (рис. 5), виконані лазерним зварюванням без присаджувального дроту мають задовільне зворотне формування корневих швів, але меншу висоту перерізу. Цей недолік усувається у разі застосування для зварювання стикових з'єднань сталей великих товщин присадочного дроту, яке виконується певних режимів зварювання.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Узагальнення результатів досліджень свідчить про те, що за рахунок вибору параметрів лазерного зварювання та швидкості подачі присадочного дроту можна досягти оптимальної геометрії, задовільного формування та необхідного посилення кореневого шва.

Зокрема встановлено, що випромінювання Nd:YAG лазера потужністю 4,4 кВт при швидкості зварювання 16 м/год дозволяє одержати в стиковому з'єднанні корневий шов з повним проплавленням та хорошим зворотним формуванням. Оптимальний (з позицій формування геометрії зварного з'єднання та відсутності дефектів) режим зварювання корневих швів з'єднань сталі 25Х2НМФА з U-подібним обробленням (рис. 3.в, рис. 3.г) наступний: потужність випромінювання 4 кВт; швидкість зварювання

16 м/год; фокусна відстань 200 мм; заглиблення фокусу 2 мм; витрати газу: CO₂ – 20 л/хв; швидкість подачі дроту діаметром 1,2 мм – 38,4 м/год.

ВИСНОВКИ

1. Результати експериментальних досліджень з лазерного зварювання корневих швів показали, що при належному складанні та дотриманні режимів зварювання створюються передумови для забезпечення повного проплавлення кореня шва без дефектів (пор і тріщин) з якісним формуванням зворотного валика шва.

2. За результатами досліджень встановлено, що більш прийнятною формою виявилася U-подібна

розробка кромок. U-подібна підготовка кромок у порівнянні з V-подібною, вимагає меншої кількості наплавленого металу, а також завдяки ширшому зазору в корені шва полегшує ведення процесу при накладенні першого кореневого шва.

3. Оптимальний (з позицій формування геометрії зварного з'єднання та відсутності дефектів) режим зварювання корневих швів з'єднань сталі 25X2НМФА з U-подібним обробленням наступний: потужність випромінювання 4 кВт; швидкість зварювання 16 м/год; фокусна відстань 200 мм; заглиблення фокусу 2 мм; витрати газу: CO₂ – 20 л/хв; швидкість подачі дроту діаметром 1,2 мм – 38,4 м/год.

REFERENCES

- [1] Aliabadi, M. A. F., Lakzian, E., Khazaei, I., & Jahangiri, A. (2020). A comprehensive investigation of finding the best location for hot steam injection into the wet steam turbine blade cascade. *Energy*, 190, 116397. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116397>
- [2] Rivaz, A., Anijdan, S. M., & Moazami-Goudarzi, M. (2020). Failure analysis and damage causes of a steam turbine blade of 410 martensitic stainless steel after 165,000 h of working. *Engineering Failure Analysis*, 113, 104557. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104557>
- [3] Quintanar-Gago, D. A., Nelson, P. F., Díaz-Sánchez, Á., & Boldrick, M. S. (2021). Assessment of steam turbine blade failure and damage mechanisms using a Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 207, 107329. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107329>
- [4] Rodríguez, J. A., Castro, L., Tejeda, A. L., García, J. C., Rodríguez, J. M., Galindo, E., & El Hamzaoui, Y. (2019). Fatigue of steam turbine blades at resonance conditions. *Engineering Failure Analysis*, 104, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.027>
- [5] Shevchenko, V. V., Minko, A. N., & Dimov, M. (2021). Improvement of turbogenerators as a technical basis for ensuring the energy independence of Ukraine. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 19–30. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.03>
- [6] Tsaryuk, A. K., Levchenko, E. V., Grishin, M. M., Vavilov, A. V., Kantor, A. G., & Bivalkevich, A. I. (2020). Welding in power engineering industry of Ukraine. *The Paton Welding Journal*, (3), 19-24. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.03.03>
- [7] Tsaryuk, A. K., Moravetsky, S. I., Skulsky, V. Yu., Grishin, N. N., Vavilov, A. V., Kantor, A. G., & Grinchenko, E. D. (2012). Development of forge-welded combined medium-pressure rotor for 325 MW steam turbine. *The Paton Welding Journal*, (8), 36–41. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2012/pdfarticles/08/8.pdf>
- [8] Balitskii, A. I., Dmytryk, V. V., Ivaskevich, L. M., Balitskii, O. A., Glushko, A. V., Medovar, L. B., ... & Krolikowski, M. A. (2022). Improvement of the mechanical characteristics, hydrogen crack resistance and durability of turbine rotor steels welded joints. *Energies*, 15(16), 6006. <https://doi.org/10.3390/en15166006>
- [9] Berdnikova, O., Pozniakov, V., Bernatskyi, A., Alekseenko, T., & Sydorets, V. (2019). Effect of the structure on the mechanical properties and cracking resistance of welded joints of low-alloyed high-strength steels. *Procedia Structural Integrity*, 16, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.026>
- [10] Khan, M. S., Soleimani, M., Midawi, A. R., Aderibigbe, I., Zhou, Y. N., & Biro, E. (2023). A review on heat affected zone softening of dual-phase steels during laser welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 102, 663-684. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.059>
- [11] Wang, C., Mi, G., & Zhang, X. (2021). Welding stability and fatigue performance of laser welded low alloy high strength steel with 20 mm thickness. *Optics & Laser Technology*, 139, 106941. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106941>
- [12] Poznyakov, V. D., Markashova, L. I., Shelyagin, V. D., Zhdanov, S. L., Bernatskyi, A. V., Berdnikova, O. M., & Sydorets, V. M. (2019). Cold cracking resistance of butt joints in high-strength steels with different welding techniques. *Strength of Materials*, 51, 843-851. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00132-7>
- [13] Balakrishnan, J., Vasileiou, A. N., Francis, J. A., Smith, M. C., Roy, M. J., Callaghan, M. D., & Irvine, N. M. (2018). Residual stress distributions in arc, laser and electron-beam welds in 30 mm thick SA508 steel: A cross-process comparison. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 162, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.03.004>
- [14] Wu, M., Luo, Z., & Ao, S. (2023). A novel welding method for extra-thick high-strength steel: Double-sided narrow gap oscillating laser and oscillating laser-TIG hybrid welding. *Optics & Laser Technology*, 164, 109432. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109432>
- [15] Zhang, H., Jiang, M., Chen, X., Wei, L., Wang, S., Jiang, Y., ... & Chen, Y. (2022). Investigation of weld root defects in high-power full-penetration laser welding of high-strength steel. *Materials*, 15(3), 1095. <https://doi.org/10.3390/ma15031095>
- [16] Ning, J., Zhang, L. J., Yang, J. N., Yin, X. Q., Wang, X. W., & Wu, J. (2019). Characteristics of multi-pass narrow-gap laser welding of D406A ultra-high strength steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 270, 168-181. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.026>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Aliabadi, M. A. F., Lakzian, E., Khazaei, I., & Jahangiri, A. (2020). A comprehensive investigation of finding the best location for hot steam injection into the wet steam turbine blade cascade. *Energy*, 190, 116397. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116397>
- [2] Rivaz, A., Anijdan, S. M., & Moazami-Goudarzi, M. (2020). Failure analysis and damage causes of a steam turbine blade of 410 martensitic stainless steel after 165,000 h of working. *Engineering Failure Analysis*, 113, 104557. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104557>
- [3] Quintanar-Gago, D. A., Nelson, P. F., Díaz-Sánchez, Á., & Boldrick, M. S. (2021). Assessment of steam turbine blade failure and damage mechanisms using a Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 207, 107329. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107329>
- [4] Rodríguez, J. A., Castro, L., Tejeda, A. L., García, J. C., Rodríguez, J. M., Galindo, E., & El Hamzaoui, Y. (2019). Fatigue of steam turbine blades at resonance conditions. *Engineering Failure Analysis*, 104, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.027>
- [5] Shevchenko, V. V., Minko, A. N., & Dimov, M. (2021). Improvement of turbogenerators as a technical basis for ensuring the energy independence of Ukraine. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 19–30. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.03>
- [6] Tsaryuk, A. K., Levchenko, E. V., Grishin, M. M., Vavilov, A. V., Kantor, A. G., & Bivalkevich, A. I. (2020). Welding in power engineering industry of Ukraine. *The Paton Welding Journal*, (3), 19-24. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.03.03>
- [7] Tsaryuk, A. K., Moravetsky, S. I., Skulsky, V. Yu., Grishin, N. N., Vavilov, A. V., Kantor, A. G., & Grinchenko, E. D. (2012). Development of forge-welded combined medium-pressure rotor for 325 MW steam turbine. *The Paton Welding Journal*, (8), 36–41. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2012/pdfarticles/08/8.pdf>
- [8] Balitskii, A. I., Dmytryk, V. V., Ivaskevich, L. M., Balitskii, O. A., Glushko, A. V., Medovar, L. B., ... & Krolkowski, M. A. (2022). Improvement of the mechanical characteristics, hydrogen crack resistance and durability of turbine rotor steels welded joints. *Energies*, 15(16), 6006. <https://doi.org/10.3390/en15166006>
- [9] Berdnikova, O., Pozniakov, V., Bernatskyi, A., Alekseenko, T., & Sydorets, V. (2019). Effect of the structure on the mechanical properties and cracking resistance of welded joints of low-alloyed high-strength steels. *Procedia Structural Integrity*, 16, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.026>
- [10] Khan, M. S., Soleimani, M., Midawi, A. R., Aderibigbe, I., Zhou, Y. N., & Biro, E. (2023). A review on heat affected zone softening of dual-phase steels during laser welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 102, 663-684. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.059>
- [11] Wang, C., Mi, G., & Zhang, X. (2021). Welding stability and fatigue performance of laser welded low alloy high strength steel with 20 mm thickness. *Optics & Laser Technology*, 139, 106941. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106941>
- [12] Poznyakov, V. D., Markashova, L. I., Shelyagin, V. D., Zhdanov, S. L., Bernatskyi, A. V., Berdnikova, O. M., & Sydorets, V. M. (2019). Cold cracking resistance of butt joints in high-strength steels with different welding techniques. *Strength of Materials*, 51, 843-851. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00132-7>
- [13] Balakrishnan, J., Vasileiou, A. N., Francis, J. A., Smith, M. C., Roy, M. J., Callaghan, M. D., & Irvine, N. M. (2018). Residual stress distributions in arc, laser and electron-beam welds in 30 mm thick SA508 steel: A cross-process comparison. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 162, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.03.004>
- [14] Wu, M., Luo, Z., & Ao, S. (2023). A novel welding method for extra-thick high-strength steel: Double-sided narrow gap oscillating laser and oscillating laser-TIG hybrid welding. *Optics & Laser Technology*, 164, 109432. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109432>
- [15] Zhang, H., Jiang, M., Chen, X., Wei, L., Wang, S., Jiang, Y., ... & Chen, Y. (2022). Investigation of weld root defects in high-power full-penetration laser welding of high-strength steel. *Materials*, 15(3), 1095. <https://doi.org/10.3390/ma15031095>
- [16] Ning, J., Zhang, L. J., Yang, J. N., Yin, X. Q., Wang, X. W., & Wu, J. (2019). Characteristics of multi-pass narrow-gap laser welding of D406A ultra-high strength steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 270, 168-181. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.026>

© Бернацький А. В., Сіора О. В., Соколовський М. В., Юрченко Ю. В., Бондарєва В. І.

Дата надходження статті до редакції: 25.10.2023

Дата затвердження статті до друку: 08.11.2023